



Universidad Politécnica de Madrid



Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía,  
Geodesia y Cartografía

Titulación de Graduado en Ingeniería Geomática y Topografía

Trabajo Fin de Grado

**CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE  
DESLIZAMIENTO DEL TERRENO EN LORCA  
MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA.**

Madrid, Julio 2014

**Alumna:** Laura Moral Fernández

**Tutora:** Rosa M<sup>a</sup> García Blanco

**Cotutora:** Alicia Rivas Medina

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ANTECEDENTES .....	4
<b>2 MARCO DE ACTUACIÓN Y TEMÁTICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 RIESGOS NATURALES .....	5
2.2 EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA.....	6
2.3 MARCO GEOGRÁFICO DE APLICACIÓN.....	8
<b>3 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS .....</b>	<b>11</b>
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	11
3.2 METODOLOGÍA.....	12
<b>4 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
4.1 REQUISITOS Y CARACTERÍSTICAS .....	16
4.2 INFORMACIÓN DE PARTIDA .....	16
4.3 CARGA Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	18
4.4 GEOPROCESOS .....	30
<b>5 DISEÑO CARTOGRÁFICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
5.1 DISEÑO CARTOGRÁFICO .....	40
5.2 RESULTADOS INTERMEDIOS .....	41
5.3 SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO .....	46
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>DESARROLLOS FUTUROS.....</b>	<b>54</b>
<b>INDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO 1. TIPOS DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO 2. NOMENCLATURA CORINE LAND COVER 2006.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO 3. CATEGORÍAS DEL MAPA GEOTÉCNICO .....</b>	<b>63</b>

## RESUMEN

El presente proyecto constituye una ampliación del proyecto final de carrera “Análisis del terremoto de Lorca 2011 mediante un Sistema de Información Geográfica” realizado en abril de 2013. Esta ampliación se centra en el estudio de la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de laderas, con una aplicación en el municipio de Lorca, localizado en la Región de Murcia. Posteriormente, se realiza una comparativa entre los resultados de este estudio y los deslizamientos de ladera ocasionados por el terremoto de Lorca 2011. Para hacer el estudio de susceptibilidad, se ha partido del Sistema de Información Geográfica (SIG) diseñado en el proyecto anterior y se ha completado con más capas de información geográfica, referentes a la estimación de la susceptibilidad del terreno, como BCN25, mapa geotécnico, de ocupación del suelo...

Todo proceso relacionado con la prevención y gestión de desastres naturales demanda la elaboración de una cartografía temática relativa a los aspectos a tratar. En este proyecto se detalla el proceso de producción de mapas de susceptibilidad del suelo a los deslizamientos usando como herramienta fundamental un SIG. Éste permite, en primer lugar, integrar, homogeneizar y analizar todas las variables que intervienen en el análisis de la susceptibilidad (pluviometría, características geotécnicas del suelo, altitud, pendiente...), en segundo lugar, integrar todos los factores intervinientes para obtener un mapa de susceptibilidad y, por último, incorporar los deslizamientos de ladera desencadenados por el terremoto de Lorca 2011 y compararlos con el mapa de susceptibilidad.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 MOTIVACIÓN

Los eventos naturales son inevitables, pero lo que sí se puede evitar, o al menos reducir, son los desastres que en ocasiones resultan de esos eventos.

En la actualidad existen numerosas poblaciones que están expuestas a la ocurrencia de movimientos repentinos, tanto de masas de suelos como de rocas, a lo largo de la pendiente de una ladera. Estos movimientos se conocen genéricamente como deslizamientos de laderas.

La ocurrencia de movimientos de masas provoca daños considerables anualmente en muchos países del mundo. Trabajos como los presentados en Shuster (1996) e IFRC (2000) muestran el gran número de pérdidas humanas (casi 200 mil en el siglo pasado) ocasionadas por derrumbes, deslizamientos y otros procesos morfodinámicos que ocurren en vertientes donde la estabilidad se ha perdido. Cuando tiene lugar el colapso, los materiales, incluyendo bloques rocosos, suelos, vegetaciones e infraestructuras, son desplazados desde las partes más altas hacia las más bajas en, a veces, grandes volúmenes.

Además de la pérdida de vidas humanas, durante estos eventos catastróficos hay también grandes impactos ecológicos y ambientales que repercuten, obviamente, en la calidad de vida de la población. Y las pérdidas económicas que la incidencia de estos hechos tiene, son a veces de considerables proporciones.

Cualquier riesgo natural, ya sean inundaciones, erupciones volcánicas, terremotos, deslizamientos de ladera o taludes, son muy complejos a la hora de predecirlos y las consecuencias que tienen, tanto para la población como para los bienes, pueden llegar a ser muy severas.

Cuando existen grandes incertidumbres sobre la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, es difícil tomar decisiones sobre las medidas, la ubicación, etc. El coste de un proyecto puede resultar muy alto o se requieren asumir riesgos de características y magnitudes no determinadas.

Con este proyecto se contribuye a los desarrollos actuales dirigidos a la mitigación de desastres, concretamente los debidos a deslizamientos de laderas. Este estudio de susceptibilidad sirve de base para un futuro estudio de peligrosidad debido a la acción sísmica o pluviométrica y, finalmente, para poder desarrollar un estudio de riesgo incorporando un catálogo de elementos expuestos.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo final de los estudios de evaluación de la peligrosidad y el riesgo a cierto fenómeno natural es que las instituciones encargadas de velar por la seguridad ciudadana, como Protección Civil, la Unidad Militar de Emergencias, ayuntamientos, aseguradoras, planificadores urbanísticos y de infraestructuras, etc., elaboren sus planes de emergencia ante una posible catástrofe asociada. Estos planes son útiles para la planificación pre-evento y post-evento.

El objetivo concreto de este estudio es el análisis de la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamiento de laderas en el municipio de Lorca, empleando para ello un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este mapa de susceptibilidad se comparará con los deslizamientos de laderas ocurridos en Lorca debido al terremoto de mayo de 2011 (actuando este como detonante de dichos deslizamientos).

Para ello se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y recopilar las variables que intervienen en la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas y adaptarlas a la metodología adoptada.
- Clasificar, homogeneizar y editar si fuese necesario, toda la información para su correcto análisis conjunto.
- Diseñar un SIG que permita almacenar e integrar todas las variables geográficas.
- Reclasificar y asignar pesos a las variables de interés.
- Combinar dichas variables para estimar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos de laderas.
- Elaborar diferentes mapas para representar gráficamente los resultados.

## 1.3 ANTECEDENTES

La utilización de un SIG para la estimación de riesgos naturales es una técnica que cada vez se emplea con mayor asiduidad, debido a las grandes ventajas que aporta a la hora de integrar, organizar y procesar las variables que intervienen en la estimación de este tipo de riesgos. También es importante resaltar el papel que realiza un SIG a la hora de gestionar y analizar la intervención de los parámetros en el resultado final y la toma de decisiones de los diferentes especialistas en la estimación del mismo (Lain, 2002).

Como consecuencia de ello, en la última década se ha incrementado notablemente el uso de estas técnicas en los estudios de riesgos naturales, incluyendo entre ellos el de deslizamiento de laderas. En España cabe destacar los estudios de riesgo de deslizamiento a escala regional de Ayala-Carcedo et al. (2003) y García-Rodríguez (2009) o de aplicación agrícola como el de Ramos et al. (2003).

## 2 MARCO DE ACTUACIÓN Y TEMÁTICA

### 2.1 RIESGOS NATURALES

Atendiendo a la espectacularidad de los avances científicos y tecnológicos de los últimos años puede dar la impresión de que se ha conseguido un dominio sobre la naturaleza casi total. Pero cuando sucede un terremoto, un volcán entra en erupción o una gran inundación arrasa una zona, se hace patente la grandeza de las fuerzas de la naturaleza que, en pocos minutos, pueden liberar energías destructoras de enorme magnitud.

Según la UNESCO (la Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura), el riesgo es la probabilidad de perder vidas humanas o riquezas naturales, como consecuencia de algún desastre de un fenómeno natural o causado por el ser humano.

En los últimos 20 años los desastres naturales han matado a 3 millones de personas en el mundo, causando daños a alrededor de otros 800 millones. Las pérdidas económicas causadas por inundaciones, sequías, terremotos, volcanes, incendios forestales, etc. son enormes (Echarri, 1998).

En España mueren al año alrededor de 100 personas, principalmente a causa de temporales marítimos, seguidos por movimientos de tierra, aludes, incendios, rayos, etc. y se pierden al año más de 600 millones de euros (algo más que el 0,2% del PIB). Las mayores pérdidas económicas las causan las inundaciones (Echarri, 1998).

El número de desastres naturales no ha aumentado en los últimos años pero al ir creciendo la población, el número de personas a los que afectan está siendo mayor cada vez. Por otra parte, el traslado de muchos habitantes a las ciudades hace que cuando se produce cualquier incidente en la proximidad de una gran ciudad las consecuencias sean dramáticas. Un solo terremoto con epicentro en la ciudad china de Tangshan mató a más de 250.000 personas en 1977 (Echarri, 1998).

## 2.2 EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA

Un deslizamiento es básicamente el movimiento pendiente abajo de una masa rocosa, detritos o tierra (Cruden, 1991), y puede tener diferentes causas, tales como geológicas, geomorfológicas, físicas y humanas. El evento que desencadena un deslizamiento es conocido como factor detonante. Las lluvias intensas, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas o rápido socavamiento basal son considerados agentes detonantes y su ocurrencia en determinadas áreas conduce a un aumento de la presión vertical (peso) o reducción de la cohesión de los materiales que conforman la vertiente, acelerando su colapso.

Un deslizamiento ocurre cuando se rompe o pierde el equilibrio y una porción de los materiales que componen una ladera se deslizan pendiente abajo por acción de la gravedad. Aunque los deslizamientos usualmente suceden en taludes escarpados, tampoco es raro que se presenten en laderas de poca pendiente. Son primariamente ocasionados por fuerzas gravitacionales, y resultan de una falla por corte a lo largo de la frontera de la masa en movimiento respecto a la masa estable; se alcanza un estado de falla cuando el esfuerzo cortante medio aplicado en la superficie potencial de deslizamiento, llega a ser igual a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo o roca (Mendoza y Domínguez, 2006).

Los deslizamientos pueden ocurrir como fallas de laderas de cerros, cañadas, barrancas y riberas de ríos, lagunas o vasos de presas; en cortes y terraplenes de carreteras, minas a cielo abierto y bancos de materiales, etc. (CENAPRED, 2004a).

También suceden deslizamientos o fallas de talud en terraplenes para presas, bordos y otras obras, así como en excavaciones para la construcción. Nuevamente, dentro del ámbito de la Protección Civil, interesan primordialmente las inestabilidades de laderas que afecten a las personas y a sus bienes en núcleos de población.

Los deslizamientos de laderas o taludes, así como las inundaciones, erupciones volcánicas y los temblores de tierra, son fenómenos naturales difíciles de predecir, en virtud de que son inciertos y tienen consecuencias serias para la población y sus bienes. "Fenómeno", "incertidumbre" y "consecuencias potenciales" necesitan ser identificados, a fin de definir el riesgo que representa el deslizamiento de una ladera natural (Mendoza y Domínguez, 2006).

En la Figura 2.1 se muestra una ladera donde se indican los principales elementos que se definen en ella y que tienen algún papel relacionado con el fenómeno del deslizamiento.



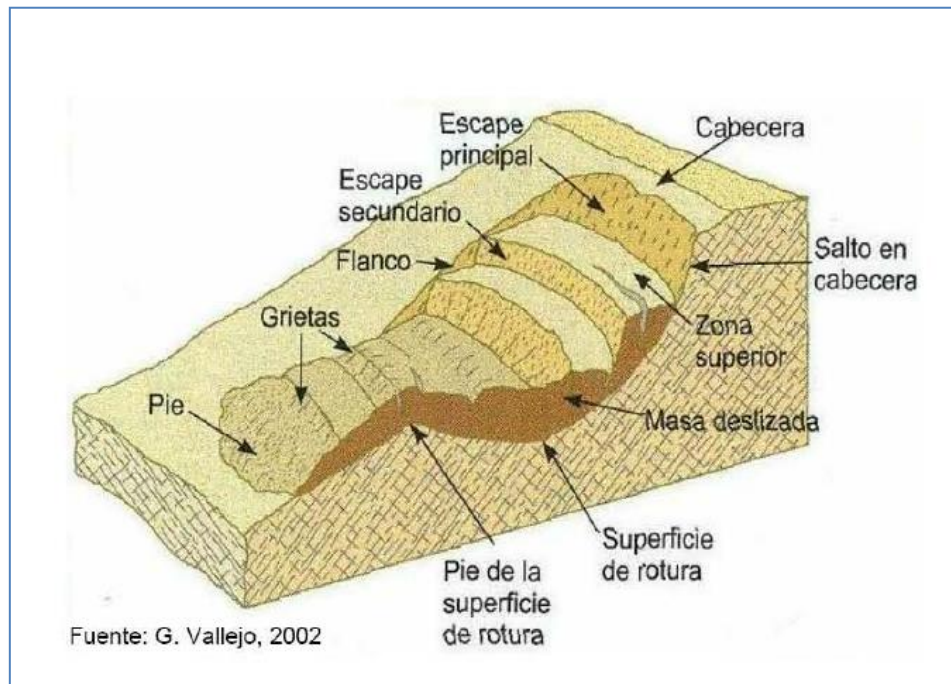


Figura 2.1. Esquema de una ladera afectada por un deslizamiento de ladera. ([www.monografias.com](http://www.monografias.com))

A continuación se definen los elementos indicados:

- Corona: Material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas de la escarpa principal.
- Superficie original del terreno: Es la superficie inclinada, o talud de una ladera, antes de que ocurra el movimiento o deslizamiento.
- Hombro: Es la zona que se encuentra en la transición de la superficie inclinada o talud de una ladera y la corona.
- Pie de la ladera: Parte más baja de la ladera.
- Pie de la superficie de falla: Línea de intersección (en ocasiones cubierta) entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno.
- Escarpa principal de falla: Es el escalón o superficie abrupta localizada en la parte superior de la ladera y contigua a la corona; resulta del movimiento del talud pendiente abajo y forma parte de la superficie de falla.
- Superficie de falla o de ruptura: Zona o lugar geométrico donde se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad, separándose de la ladera remanente.
- Cuerpo principal: Aquella parte del material desplazado sobre la superficie de ruptura. En ocasiones ese material permanece sobre la superficie de deslizamiento (falla contenida), pero otras veces se "vacía" totalmente, dando como resultado los flujos.

- Flanco: Es el costado de un deslizamiento de tierras. Se indica derecho o izquierdo, refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona.
- Zona de acumulación o base: Área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno; esto es el área cubierta por el material fallado, abajo del pie de la superficie de falla.
- Plataforma: Porción superior del talud más allá de la corona.
- Punta o uña: Punto de la base del deslizamiento que se encuentra más distante de la corona.

Hay distintos tipos de deslizamientos, los cuales se explican en el trabajo presentado por ALCANTARA AYALA, Irasema (2000). Se enumeran a continuación y son desarrollados en el *Anexo 1*.

- Desprendimientos o caídas
- Vuelcos o desplomes
- Deslizamientos
- Flujos
- Expansiones laterales
- Movimientos complejos

## 2.3 MARCO GEOGRÁFICO DE APLICACIÓN

La Región de Murcia (Figura 2.2), comunidad autónoma uniprovincial española situada en el sudeste de la Península Ibérica, entre Andalucía (provincias de Granada y Almería) y la Comunidad Valenciana (provincia de Alicante), y entre la costa mediterránea y Castilla-La Mancha (provincia de Albacete). Esta se sitúa en el extremo oriental de las Cordilleras Béticas donde aproximadamente el 27% del territorio murciano corresponde a relieves montañosos, el 38% a depresiones intramontanas y valles corredores, y el 35% restante a llanuras y altiplanicies.

La Región de Murcia se sitúa en el extremo oriental de las Cordilleras Béticas, viéndose influida climatológicamente por una orografía que la aísla de la influencia atlántica.



Figura 2.2. Mapa de situación de Lorca, Región de Murcia ([www.finanzzas.com](http://www.finanzzas.com))

La población total de la Región de Murcia es de 1.472.049 habitantes, de los que algo menos de un tercio vive en la capital y la mitad vive en otros municipios de la región. Se trata de una comunidad relativamente pequeña al ser uniprovincial, la 9ª de España en superficie y la 10ª en población por delante de Aragón o Asturias, pero en su condición de provincia es de las más pobladas de las 50 que tiene el país.

También hay que destacar la existencia de importantes fallas en toda la zona, como la falla de Alhama de Murcia, la falla de Carrascoy o las del Bajo Segura, que junto con otras fallas menores generan numerosos movimientos de tierra, como los terremotos de Mula en 1999, Bullas en 2002, La Paca 2005 y Lorca en 2011. Estos sismos son detonantes de deslizamientos de ladera en terrenos susceptibles.

En concreto, la zona considerada como extensión para este proyecto (Figura 2.3) está comprendida entre los 37,2º u 38,2º de latitud norte y los -1,1º y -2,1º de longitud oeste en el entorno del municipio de Lorca. Se localiza en la cordillera Bética, el extremo más occidental el cinturón orogénico Alpino donde se han sucedido una serie de terremotos instrumentales e históricos a lo largo de la falla Alhama de Murcia, responsable del reciente terremoto de Lorca y de los desprendimientos de ladera que ocasionó.



Figura 2.3. Mapa con la extensión de la zona de estudio en la región de Murcia (UTM30N-ETRS89)

## 3 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO DE LADERAS

En el campo de los deslizamientos o de la inestabilidad de laderas existe una amplia diversidad de términos, definiciones y conceptos para hacer referencia al tema de los deslizamientos, y a la susceptibilidad del suelo a desplazarse. La terminología empleada suele variar dependiendo del usuario (investigadores, protección civil, periodistas, público en general...). Diversos autores de disciplinas afines han propuesto definiciones y términos comunes para el estudio y gestión de los deslizamientos de laderas; sin embargo, con frecuencia no hay consenso ni consistencia en las definiciones. Es claro que las definiciones, términos y su interpretación deben ser, en esencia, los mismos para todas las disciplinas, con modificaciones menores para adecuarlas a situaciones particulares.

### 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Para contextualizar este trabajo es importante precisar términos y significados que ayuden a comprender mejor lo expuesto en esta memoria. Por lo tanto, se definen a continuación los términos más usados al igual que los necesarios para el cálculo del riesgo, propuesto como línea de desarrollo futura.

Para el caso, se adoptan los términos y definiciones propuestos por UNDRO (United Nations Disaster Relief Coordinator Office, 1991) y por el Comité sobre Evaluación del Riesgo de Deslizamientos del Grupo de Trabajo de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS).

- **Peligrosidad o amenaza natural (H):** se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente perjudicial (en este estudio los deslizamientos de laderas), dentro de un período de tiempo determinado y en un área específica.

La peligrosidad se expresa como función de la susceptibilidad del terreno a deslizarse (S) y del detonante (T).

- **Susceptibilidad (S):** indica la predisposición del terreno a la ocurrencia o no del fenómeno.

- **Detonante (T):** es la acción de inicio o disparo del fenómeno del deslizamiento, que normalmente se identifica con fuertes lluvias o con terremotos.
- **Estimación del riesgo (R):** se obtiene al relacionar la peligrosidad o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (E).
  - **Elementos expuestos (E):** son la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.

La interrelación de todos estos factores se muestra en el siguiente esquema (Figura 3.1):



Figura 3.1. Esquema relacional de los diferentes conceptos para el cálculo del riesgo de deslizamiento

Una vez expuestos los conceptos básicos en relación al riesgo de deslizamientos se debe aclarar que este proyecto solo alcanza el análisis de la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de ladera. La peligrosidad y el riesgo de deslizamientos se proponen como líneas de desarrollo futuras.

## 3.2 METODOLOGÍA

De todas las metodologías que actualmente ofrece la literatura para estimar la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de laderas, en este trabajo se ha empleado la propuesta por Mendoza y Domínguez (2006) por la completitud y diversidad que ofrece en los factores de susceptibilidad y por la sencillez que presenta a la hora de implementarla dentro del Sistema de Información Geográfica.

Esta metodología empírica es de naturaleza cualitativa y está basada en la metodología propuesta por Suárez (1998), incorporando a la anterior modificaciones y criterios más amplios a la hora de estudiar los factores de susceptibilidad.

Las metodologías cualitativas de estimación de la susceptibilidad del terreno a deslizamiento están basadas en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores influyentes según sus atributos. Tales factores reúnen aspectos topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales. En función de la suma total de las calificaciones asignadas, se establecieron cinco grados de la susceptibilidad del deslizamiento (muy bajo a muy alto).

Los valores propuestos para calificar los diversos atributos de una ladera deben considerarse sólo indicativos, y deberán revisarse regionalmente para irse adecuando atendiendo a las experiencias de deslizamientos pasados y los que ocurran en el futuro (Mendoza y Domínguez, 2006).

En las siguientes tablas (Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3) se muestran los factores que proponen los autores para estimar la susceptibilidad del terreno, así como la clasificación de los mismos y el peso relativo.

Tabla 3.1. Tabla original del método para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas considerando los factores topográficos e históricos.

FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio. Úsele clinómetro.
	35° a 45°	1.8	
	25° a 35°	1.4	
	15° a 25°	1.0	
	Menos de 15°	0.5	
Altura	Menos de 50m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada.
	50 a 100 m	1.2	
	100 a 200 m	1.6	
	Más de 200 m	2.0	
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área.	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños
	Algunos someros	0.4	
	Sí, incluso con fechas	0.6	

Tabla 3.2. Tabla original del método para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas considerando los factores geomorfológicos y ambientales.

FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Evidencias geomorfológicas de hueco en laderas contiguas	Inexistentes	0	Formas de conchas o de embudo (flujos)
	Volúmenes moderados	0.5	
	Volúmenes faltantes	1.0	
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.0	Considérense no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima
	Cultivos anuales	1.5	
	Vegetación intensa	0	
	Vegetación moderada	0.8	
	Área deforestada	2.0	
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud
	Nivel freático inexistente	0	
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua	1.0	

Tabla 3.3. Tabla original del método para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas considerando los factores geotécnicos.

FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS		ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Tipos de suelos y rocas	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión, suelos de consistencia blanda
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas		1.2 a 2.0	
	Suelos arcillosos consistentes arenolimosos compactos		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5 según el grado de meteorización
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización
Espesor capa del suelo	Menos de 5 m		0.5	Revísense cortes y cañadas; o bien, recúrranse a exploración manual.
	5 a 10 m		1.0	
	10 a 15 m		1.4	
	15 a 20 m		1.8	
Aspectos estructurales en formaciones rocosas	Echado de la discontinuidad	Menos de 15°	0.3	Considérense planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad
		25 a 35°	0.6	
		Más de 45°	0.9	
	Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud	Más de 10°	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud
		0° a 10°	0.5	
		0°	0.7	
		0° a -10°	0.8	
		Más de -10°	1	
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección de talud	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas
		10° a 20°	0.3	
		Menos de 5°	0.5	



Modificaciones realizadas en las tablas originales para adaptarlas a las características de esta aplicación:

1. Factores topográficos e históricos.
  - Factor de la altura, considerado como el desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada, se le denominó desnivel de laderas para evitar una confusión de conceptos con la nomenclatura.
  - Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área. No se han tenido en cuenta.
2. Factores geotécnicos:
  - Aspectos estructurales en formaciones rocosas: No se han tenido en cuenta debido a que como los materiales no son sedimentarios, el término de buzamiento (llamado echado en el método original) no es válido para evaluar la estabilidad de las laderas por las características estructurales y resistentes de los materiales de la zona de estudio.
3. Factores geomorfológicos y ambientales:
  - No se han tenido en cuenta los pesos en relación con el nivel freático debido a la falta de información de la zona de estudio.

## 4 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para la realización de un estudio en el que se analiza la combinación espacial de diferentes variables, como es el caso que nos ocupa, es imprescindible dar a todas ellas una correcta posición geográfica, complementada con las características que las identifican. Por este motivo, el Sistema de Información Geográfica (SIG) diseñado en este estudio se considera como la herramienta óptima para la elaboración, análisis y presentación de resultados.

Por otro lado, este proyecto se presenta como una ampliación del proyecto “Análisis del terremoto de Lorca de 2011 mediante un Sistema de Información Geográfica” mencionado anteriormente. De igual forma, el Sistema de Información Geográfica es fruto de la integración de nueva información y/o modificación y combinación de información existente al SIG diseñado en dicho proyecto. En el apartado *Carga y tratamiento de Datos* solo se realiza la descripción de la información que no estaba ya integrada en el SIG, es decir, que es exclusivamente objeto de este proyecto.

### 4.1 REQUISITOS Y CARACTERÍSTICAS

En base a los objetivos generales y específicos desarrollados en el proyecto se determinan los requisitos y características que tendrá el SIG, tales como la escala de trabajo y el sistema de referencia. Estas características también estarán condicionadas por la información de partida.

### 4.2 INFORMACIÓN DE PARTIDA

La búsqueda, recopilación y selección de la información de partida ha constituido una de las fases más largas y costosas de este proyecto. Tras conseguir recopilar toda la información necesaria, se procedió a su homogeneización e incorporación al SIG. A continuación se describe toda la información geográfica recopilada para la realización del presente estudio así como las instituciones que la han facilitado:

- Cartografía base de la Región de Murcia (Núcleos de población, división administrativa municipal y regional). Esta información estaba en formato vectorial, con ficheros tipo shapefile (\*.shp) y fue obtenida del Proyecto RISMUR. Sistema de Coordenadas ETRS89.
- Hojas 0953C3, 0953C4, 0975C1 y 0975C2 de la Base Cartográfica Nacional 1:25000 (BCN). Ficheros tipo (\*.shp). Perteneciente al IGN. Sistema de Coordenadas ETRS89.
- Mapa Geológico en formato vectorial, fichero tipo shapefile (\*.shp) generado en el proyecto RISMUR. Sistema de Coordenadas ETRS89. Escala 1:200000.
- Mapa de ocupación del suelo en España, correspondiente al proyecto europeo Corine Land Cover 2006. Está disponible en formato shapefile (\*.shp) provisto por el Instituto Geográfico Nacional. Sistema de Coordenadas ETRS89 y Sistema cartográfico de representación. Escala 1:100000
- Un mapa con los deslizamientos de ladera ocurridos en las proximidades de Lorca después del terremoto. Formato \*.jpeg obtenido de la página web llamada Science Direct ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), 2013).

#### 4.2.1 Escala de Trabajo

Teniendo en cuenta que la zona de estudio engloba la ciudad de Lorca y sus inmediaciones, la escala de trabajo de la mayoría de los análisis que se llevarán a cabo será 1:25000, dado que es la más conveniente para homogeneizar los datos de partida. En el caso de capas ráster se fijó una resolución de 10 m.

#### 4.2.2 Sistema de Referencia

Para la realización del análisis, se eligió como sistema de referencia el ETRS89, tal como aparece publicado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) el 29 de Agosto de 2007.

*“CAPÍTULO I. Artículo 3. Sistema de Referencia Geodésico”.*

*Se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. En el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tienen asociado el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE, y sus densificaciones.”*

La proyección cartográfica es UTM (Universal transversa de Mercator) en el huso 30 latitud Norte.

### 4.2.3 Herramienta de Trabajo

El software que se ha utilizado para la implementación del Sistema de Información Geográfica, ha sido ArcGIS V.10 de ESRI. ArcGIS constituye una familia de productos de software para construir un SIG completo. Esta familia es producida y comercializada por la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute). Este software permite realizar todos los procesos del Sistema de Información Geográfica en un mismo espacio, desde la captura de datos, edición geométrica y análisis de variables hasta la producción cartográfica. Las aplicaciones que se han utilizado han sido:

- ArcCatalog: Aplicación compartida que permite organizar y clasificar toda la información del SIG. Esta herramienta se ha empleado para gestionar las capas de información geográfica.
- ArcToolbox: Aplicación compartida donde se encuentran las herramientas para realizar distintas operaciones de análisis con la información geográfica. Esta herramienta permitirá combinar información en diferentes formatos (vectorial y ráster) y obtener nuevas capas de información. Esta herramienta ha sido empleada para desarrollar todos los geoprosesos y parte del tratamiento de la información.
- ArcMap: Aplicación que permite editar información geográfica, visualizarla de forma combinada y crear mapas. Esta herramienta ha sido utilizada para visualizar de forma conjunta todas capas de información del SIG, para analizar la información, establecer uniones espaciales entre ellas y para diseñar los mapas.

## 4.3 CARGA Y TRATAMIENTO DE DATOS

### 4.3.1 Carga de datos

Una vez completada la recopilación de la información (Véase apartado 4.2), se procede a su integración en la aplicación del SIG que vaya a utilizarse, en este caso ArcGIS. Para ello, fue necesario transformar esa información a los distintos formatos que utiliza el Software. Los formatos básicos que utiliza este programa son:

- Feature Class, son capas de información en formato vectorial. Estas capas son una colección de objetos geográficos con el mismo tipo de geometría: punto, multipunto, línea o polígono.
- Ráster Data Set, son capas de información en formato ráster.
- Table, representan las clases abstractas de un SIG y se caracterizan por no tener representación geográfica.

Estas capas de información geográfica y alfanumérica, pueden agruparse en Geodatabase, estos son compartimentos de almacenamiento de información del programa. Toda la información geográfica que hay en una Geodatabase debe tener el mismo sistema de referencia. Estos compartimentos de información pueden dividirse a su vez en otros compartimentos de nivel inferior:

- Feature Data Set, permite agrupar distintas clases de entidades vectoriales del estudio con diferente geometría en un mismo espacio. Todas las clases contenidas deben tener el mismo marco espacial.
- Data Set Ráster, permite agrupar un conjunto de capas ráster con las mismas propiedades, referentes a la resolución y el marco espacial.

Otros formatos propios de ArcGIS, que no tienen distribución jerárquica son:

- Ficheros Shapefile (\*.shp). Usados para almacenar información vectorial.
- Ficheros Grid. Usados para almacenar información ráster.
- Ficheros Layer (\*.lyr). Usados para almacenar simbologías.

Para construir el sistema de información geográfica se ha utilizado una estructura de los datos más, en este caso distinguiendo entre información de partida, información intermedia o de paso e información de salida. Esta estructura ha permitido poder estructurar mejor el flujo de tratamiento y procesamiento de datos.

- Datos de Entrada: Información inicial del estudio.
- Datos Intermedios: distintas capas y tablas, producto de diferentes procesos que nos ayudaran a obtener los resultados finales.
- Datos de Salida: resultados de nuestro estudio que servirán como datos de entrada para futuros estudios.

#### *4.3.2 Tratamiento de datos*

Este apartado contiene una explicación pormenorizada de toda la información de partida, recopilada previamente. Se han llevado a cabo procesos de homogenización y tratamiento de esta información para poder introducirse como parte de la estructura del SIG.

#### 4.3.2.1 Cartografía Base

Todas estas capas son datos de entrada de carácter vectorial en formato shapefile (\*.shp). Se describen detalladamente las capas y sus características.

Se diferencian dos apartados, en el primero todos los datos de entrada han sido introducidos directamente sin cambios previos puesto que ya se encontraban homogeneizados. Se caracterizan por cumplir inicialmente con los requisitos del SIG (Figura 4.1).

- Municipios.shp: capa superficial dividida en 44 entidades que representan las áreas municipales en las que se divide la Región de Murcia. Su principal atributo es el nombre del municipio.
- Nucleos\_Poblacion.shp: capa puntual compuesta por 1.032 entidades que sitúan geográficamente la existencia de un núcleo de población.

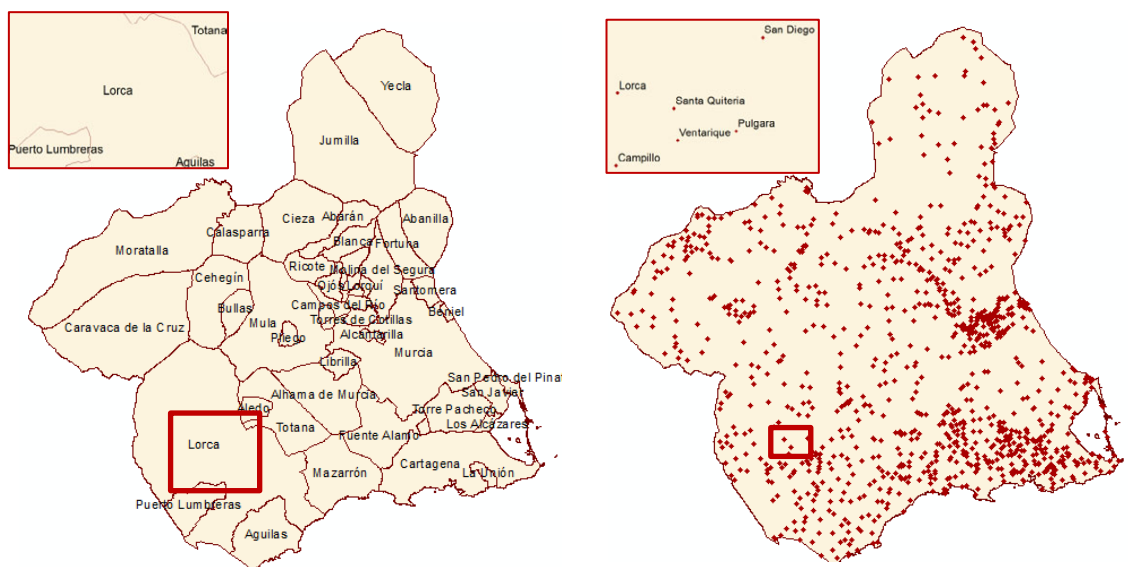


Figura 4.1. Izq. La capa de municipios. A la derecha, la capa de núcleos de población.

El segundo apartado se caracteriza por la homogeneización de los datos de entrada puesto que no cumplen los requisitos del SIG. Se dividen en los siguientes subapartados:

##### Altimetría

La información referente a la altimetría de la ciudad de Lorca y sus inmediaciones no se encuentra homogeneizada. De las hojas descargadas de la Base Cartográfica Nacional 1:25000

(BCN) se seleccionaron los archivos que contienen las curvas de nivel y los puntos acotados, y con ellos se creó un TIN (Modelo de Triángulos Irregulares)<sup>1</sup>.

Una vez creado el modelo TIN, se convirtió el archivo a ráster para crear el MDT<sup>2</sup> (Figura 4.2). El modelo digital generado tiene una resolución de 10 m.

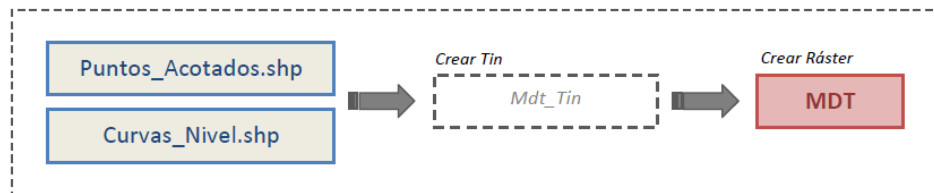


Figura 4.2. Esquema del proceso de obtención del Modelo Digital del Terreno (MDT).

Descripción de la capa final obtenida:

- Modelo Digital del Terreno (MDT) (Figura 4.3): Un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. En el MDT, de tipo ráster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada (Laín, H. L., 1999).

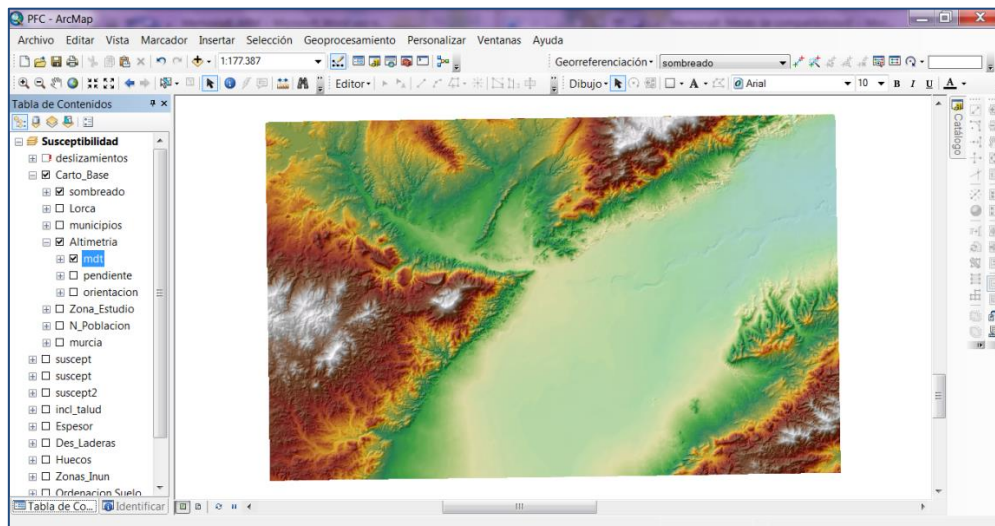


Figura 4.3. Modelo Digital del Terreno (MDT). mdt.shp.

<sup>1</sup> 3D Analyst > Administración de TIN > Crear TIN

<sup>2</sup> 3D Analyst > Conversión > Desde TIN > De TIN a ráster

#### 4.3.2.2 Cartografía Temática

##### Deslizamientos

Inicialmente, se dispone de una imagen (\*.jpg) de los deslizamientos de ladera con coordenadas. La visualización en ArcGIS, la georreferenciación<sup>3</sup> y la digitalización de los puntos permite crear una capa puntual nueva (\*.shp), en el que cada elemento puntual corresponde con un deslizamiento de ladera catalogado como detonado por el terremoto.

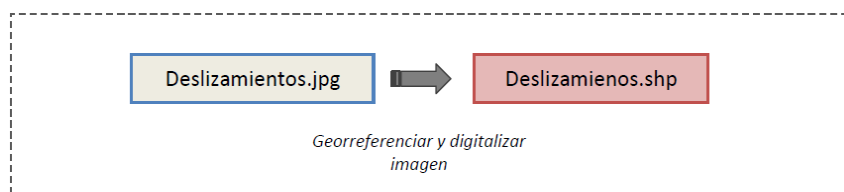


Figura 4.4. Esquema del tratamiento de datos realizado para obtener los datos de entrada referente a los deslizamientos de ladera.

- Deslizamientos.shp: capa creada con la localización de los 182 deslizamientos de laderas producidos por el sismo de Lorca 2011 (Figura 4.5).

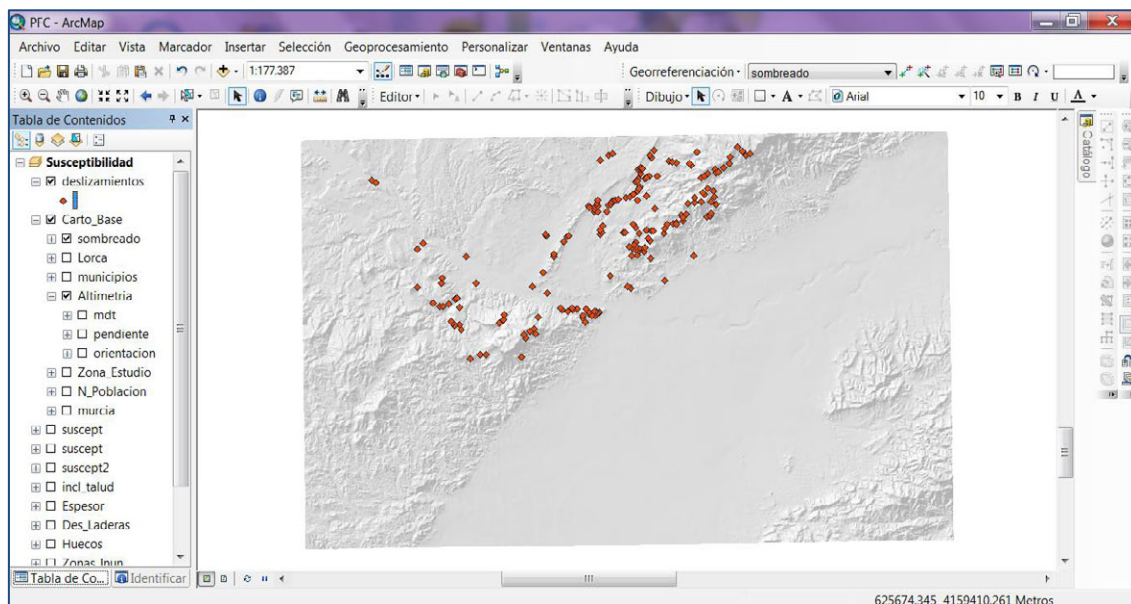


Figura 4.5. deslizamientos.shp.

<sup>3</sup> Herramientas > Georreferenciación



## Base Cartográfica Nacional a escala 1:25000

La Base Cartográfica Nacional aporta información sobre tres factores intervinientes en la susceptibilidad como son: las curvas de depresión, los puntos acotados y las zonas inundables.

Lo primero que se hizo fue identificar y clasificar la información gracias a la tabla de códigos de la Base Cartográfica Nacional (BCN). A continuación se extrajeron las capas que resultaban de interés para el estudio (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Información Geográfica de las capas de interés de la Base Cartográfica Nacional (BCN)

CONTENIDO DE LA CAPA	REPRESENTACIÓN	USO
Curvas de depresión	Lineal	Determinar huecos
Puntos Acotados	Puntual	Determinar huecos
Laguna, Embalse, Canal, Acequia y Río (Zonas Inundables)	Lineal	Determinar régimen de agua en laderas

Las capas obtenidas son fundamentales para el cálculo de las evidencias geomorfológicas "huecos" en laderas contiguas y el régimen de agua en ladera, que han sido dos de los factores geomorfológicos y ambientales que se tuvieron en cuenta para el cálculo de la susceptibilidad.

- Curvas\_depresion.shp: Capa lineal donde se fusionan<sup>4</sup> las 40 curvas de depresión localizadas dentro de las cuatro hojas de la Base Cartográfica Nacional que componen la zona de estudio (Figura 4.6).
- Ptos\_Aco\_depresion.shp: Capa puntual que representa la fusión de los 39 puntos con cota seleccionados<sup>5</sup> que están localizados dentro de una curva de depresión (Figura 4.6).
- Zonas\_Inundables.shp: Capa lineal con 650 elementos que representan las zonas inundables. Estos elementos fueron aislados de la Base Cartográfica Nacional (laguna permanente, embalse, canal menor a 3m de ancho, acequia y río no permanente) y fusionados en esta capa (Figura 4.6).

<sup>4</sup> Data Management tools > General > Fusionar

<sup>5</sup> Seleccionar > Selección por Localización

## Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un Sistema de Información Geográfica.

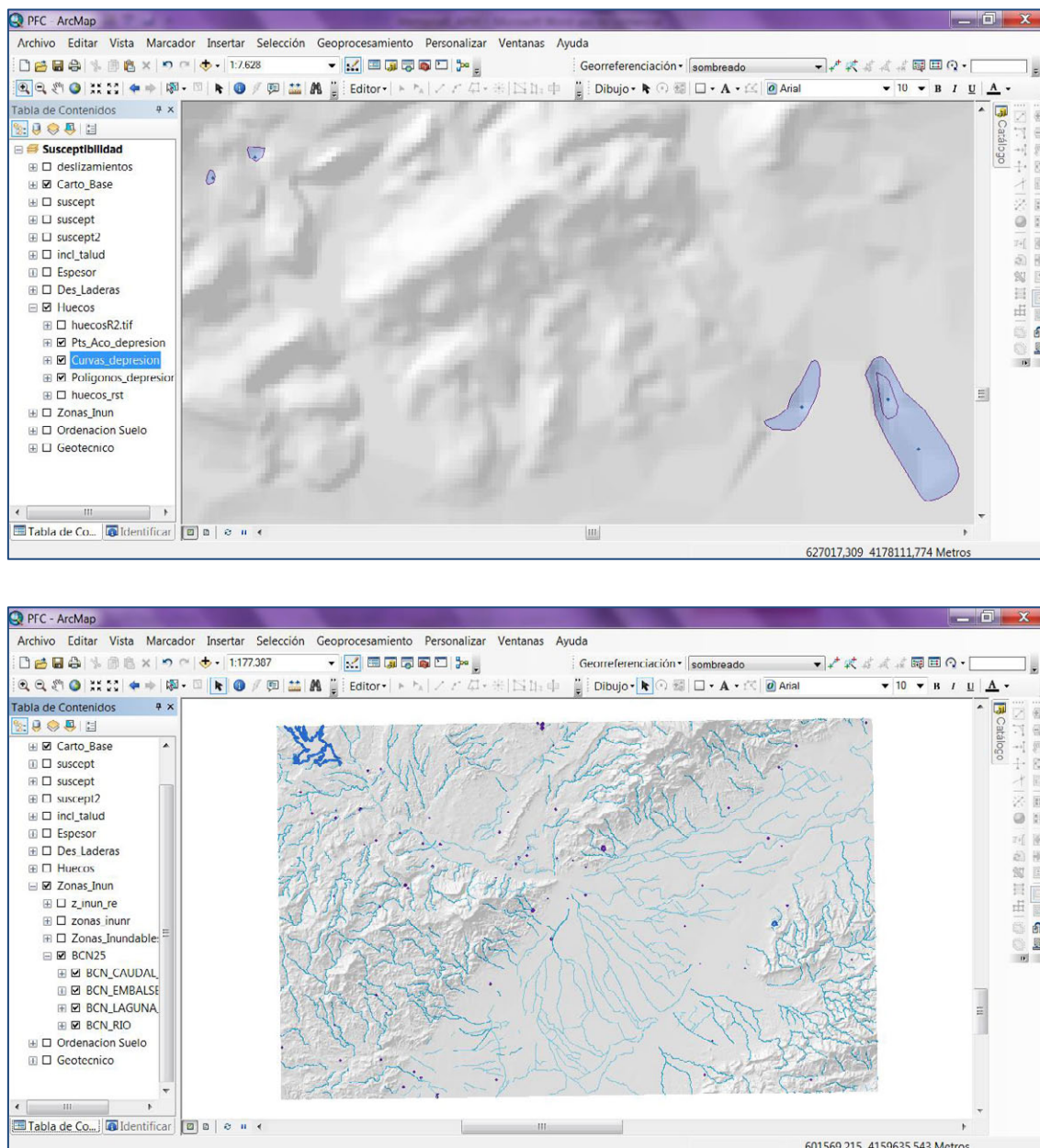


Figura 4.6. Arriba las capas *Curvas\_depresion.shp* y *Ptos\_Aco\_depresion.shp*. Abajo la capa *Zonas\_Inundables.shp*

### Geológico

El proyecto RISMUR nos proporcionó el mapa geológico, ya homogeneizado, cuya información adicional incluía una explicación geotécnica del mismo. Esta información es indispensable para la reclasificación del mapa y por lo tanto, para la asignación de pesos según la metodología empleada y el cálculo de la susceptibilidad. A continuación se visualiza la capa *Geotecnico\_Zona.shp* obtenido del recorte del mapa original respecto a la zona de estudio (Figura 4.7).

- Geotécnico\_Zona.shp: capa superficial dividida en 337 entidades que representan las diferentes áreas de terreno en función del tipo de roca o suelo. Su principal atributo es el código que identifica la clase geotécnica (AMPLIFICAC).

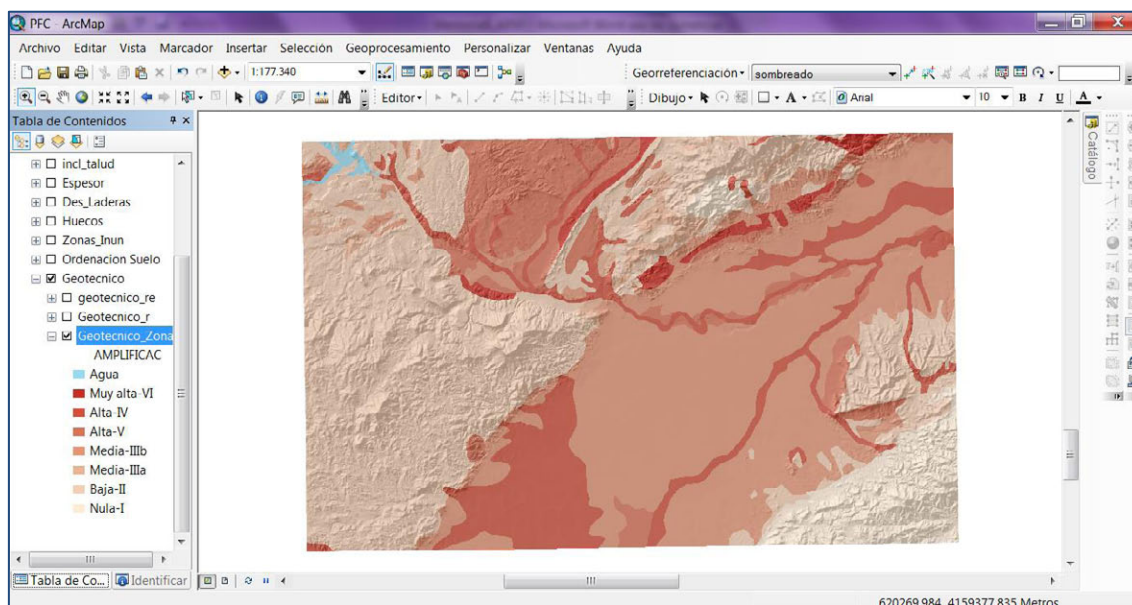


Figura 4.7. Visualización de la capa Geotécnico\_Zona.shp

## Usos del Suelo

La información referente a la vegetación y uso del suelo de la zona de estudio se encuentra homogeneizada y se obtuvo del proyecto europeo Corine Land Cover 2006. Este proyecto nos proporcionó un mapa de ordenación del suelo de España que se recortó<sup>6</sup> con la extensión de la zona de estudio obteniéndose la siguiente capa:

- Usos\_suelo.shp (Figura 4.8): capa superficial dividida en 185 entidades que representan las diferentes áreas de terreno en función de la vegetación o uso que se le dé. Su principal atributo es el código que identifica la vegetación o uso del terreno (code\_06).

<sup>6</sup> Data Management tools > General > Recortar

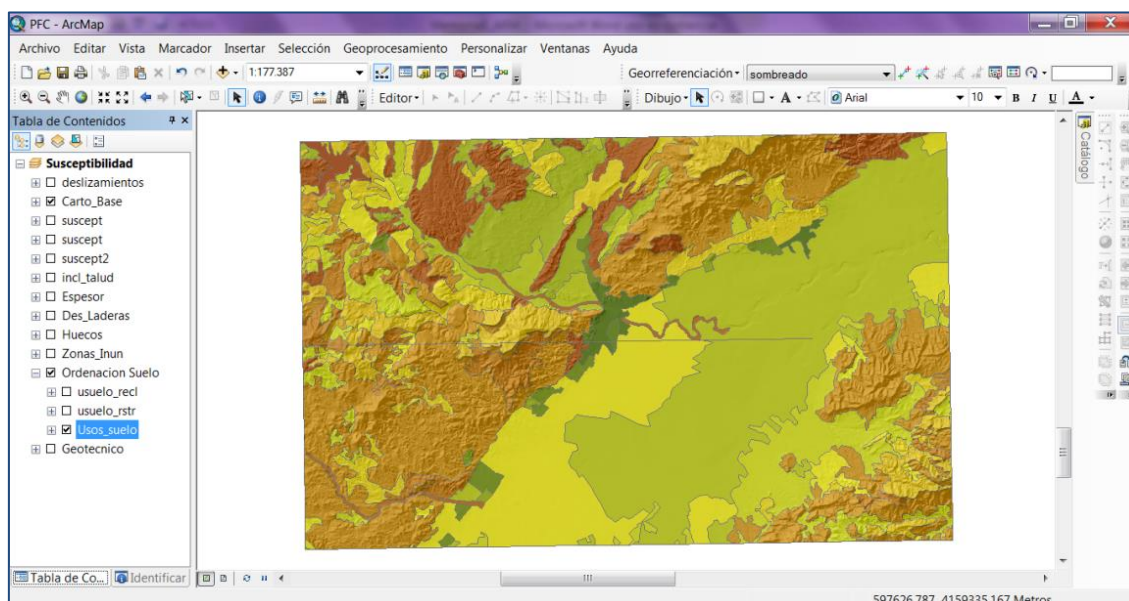


Figura 4.8. Visualización de la capa Usos\_suelo.shp.

### 4.3.3 Edición Geométrica

En este capítulo se explica la corrección geométrica que hubo que realizar a parte de la información. Principalmente se verificó que las curvas de depresión de la Base Cartográfica Nacional (BCN) estuviesen perfectamente conectadas para la creación de polígonos. También se verificó que todos los elementos de las capas correspondiesen con la temática de la capa a la que pertenecen.

### 4.3.4 Edición de la Base de Datos

A continuación se van a detallar aquellas capas cuyas bases de datos han tenido que sufrir algún proceso:

#### Polígonos de depresión





Primero se creó<sup>7</sup> una capa de polígonos de depresión a partir de las curvas de depresión. Y posteriormente, se establecieron los atributos necesarios y se editaron empleando los valores de las cotas de los puntos acotados y conociendo la equidistancia (10m).

---

<sup>7</sup> Data Management tools > Entidades > De entidad a polígono

Para el cálculo del volumen se diferenciaron 4 casos posibles que se detallan en la **Tabla 4.2**:

Tabla 4.2. Ecuaciones para el cálculo del volumen de huecos

REPRESENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
	Hueco formado por una curva sin punto acotado. Código: 1	$V = S * \text{Equidistancia}$
	Hueco formado por una curva y con punto acotado. Código: 2	$V = S * (\text{Equidistancia} - \text{cota})$
	Hueco formado por varias curvas sin punto acotado. Código: 3	$V_e = ((S_e + S_i)/2) * \text{Equidistancia}$ $V_i = (S_i/2) * (\text{Equidistancia} / 2)$
		$V_T = V_e + V_i$
	Hueco formado por varias curvas con punto acotado. Código: 4	$V_e = ((S_e + S_i)/2) * \text{Equidistancia}$ $V_i = (S_i/2) * ((\text{Equidistancia} - \text{cota})/2)$
		$V_T = V_e + V_i$

El resultado de este análisis fue la siguiente capa:

- Poligonos\_depresion1.shp: Capa poligonal con 40 entidades que representan los huecos o evidencias geomorfológicas. Contiene los siguientes atributos (Figura 4.9):
  - Cota: cota de la curva de depresión.
  - Cota\_Pto: cota del punto asociado a la curva de depresión, si existe.
  - Superficie: área<sup>8</sup> que encierra la curva de depresión.
  - Id\_huecos: código para el cálculo del volumen de huecos (Tabla 4.2).
  - Vol: volumen del cono irregular calculado de cada hueco.

<sup>8</sup> Editor > Herramientas de edición > Edición avanzada > Calcular geometría



Poligonos_depresion1							
	FID	Shape *	Superficie	Id huecos	Cota	Cota Pto	Vol
	29	Polígono ZM	21490,817052	2	330	317	279380,622
	32	Polígono ZM	2509,989363	4	260	255	139099,311
	34	Polígono ZM	24682,375541	4	270	261	139099,311
	7	Polígono ZM	18744,340302	2	330	323	131210,382
	16	Polígono ZM	17541,918441	2	350	343	122793,429
	10	Polígono ZM	15921,365117	2	360	353	111449,556
	18	Polígono ZM	17423,393772	2	330	325	87116,969
	0	Polígono ZM	7484,424254	1	350	0	74844,243
	4	Polígono ZM	6911,436647	2	330	324	41468,62

Figura 4.9. Visualización en ArcGIS de la capa polígonos de depresión

### Tipo de Suelo

Para poder realizar la asignación de pesos en función del tipo de suelo fue necesario reclasificar<sup>9</sup> el mapa geológico original. Para ello, primero se llevó a cabo una fase de identificación de cada clase geotécnica del mapa original, explicadas en el proyecto RISMUR. En el *Anexo 2* se muestran las 8 categorías del mapa geotécnico original que fueron reclasificadas en las 5 clases propuestas por la metodología elegida.

En la zona de estudio no hay ningún polígono que tenga asignada la clase IIa del mapa geotécnico original, por lo tanto, se ha suprimido de la reclasificación. En la Tabla 4.3 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se visualiza la reclasificación realizada y la capa editada (Geotecnico\_Zona.shp):

Tabla 4.3. Reclasificación del mapa geotécnico

CLASES GEOTÉCNICAS ORIGINALES	CLASES GEOTÉCNICAS DE LA METODOLOGÍA
I	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc).
IIb	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes
IIIa	Suelos arcillosos consistentes areno limosos compactos
IIIb	
IV	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas
V	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua.
VI	
	Formaciones poco consolidadas

<sup>9</sup> *Spatial analyst tools > Reclasificar > Reclasificar*

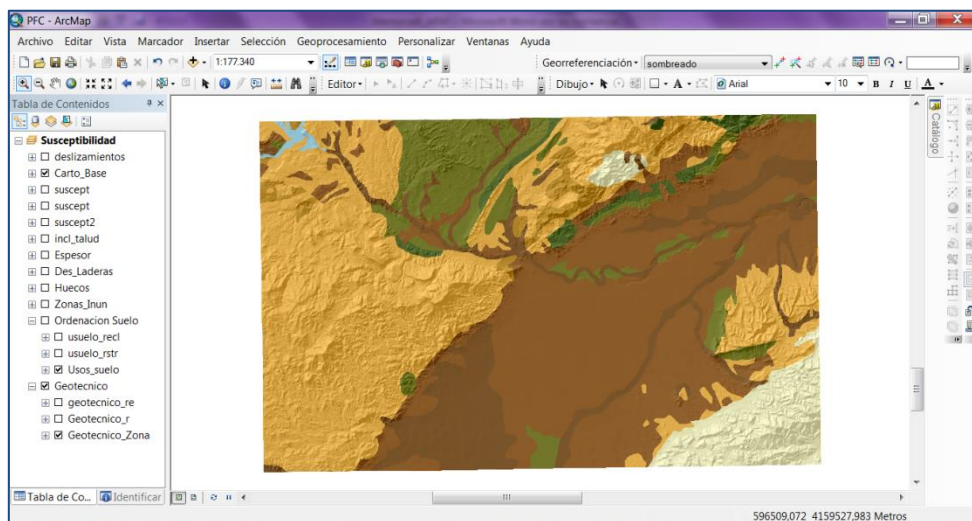


Figura 4.10. Visualización en ArcGis de la capa Geotécnico\_Zona.shp reclasificada.

### Usos del Suelo Reclasificado

A partir del mapa de ordenación del suelo en España, compuesto por 44 categorías distintas, se hizo una conversión a capa ráster y se realizó una reclasificación de los usos del suelo hasta agruparlos en 5 categorías que eran las que intervenían en la metodología seleccionada.

Como paso intermedio, fue necesario consultar la nomenclatura del proyecto europeo Corine Land Cover 2006 (Anexo 3) para seleccionar de la base de datos original solo las categorías existentes en la zona de estudio. En la Tabla 4.4 y la Figura 4.11 se exponen la reclasificación realizada y la capa ráster obtenida (usuelo\_recl) respectivamente.

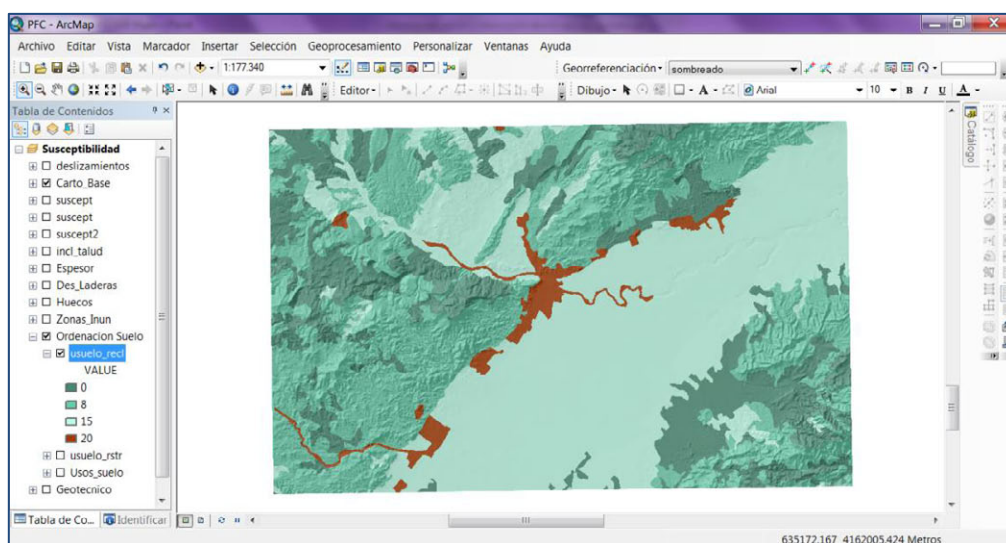


Figura 4.11. Capas obtenida de un proceso de edición y reclasificación: usuelo\_recl.shp

Tabla 4.4. Reclasificación del mapa original de Usos del Suelo en 5 categorías.

CODIGO	CLASIFICACIÓN ORIGINAL	CLASIFICACIÓN FINAL
111	Territorio urbano continuo	Zona urbana
112	Territorio urbano discontinuo	
121	Zonas industriales y comerciales	
131	Extracción de materiales	
133	Canteras	
211	Tierras de cultivo fuera de zonas de regadío	Cultivos anuales
212	Zonas de regadío permanente	
222	Árboles y arbustos frutales	Vegetación intensa
223	Olivares	
242	Sistemas parcelarios y de cultivo complejos	Cultivos anuales
243	Superficies esencialmente agrícolas, interrumpidas por espacios naturales importantes	Vegetación intensa
312	Bosques de coníferas	
313	Bosques mixtos	
323	Vegetación esclerófila	Vegetación moderada
324	Bosque y vegetación arbustiva que están cambiando	
331	Playas, dunas y arenales	Área deforestada
333	Vegetación poco frondosa	Vegetación moderada
512	Planos de agua	Agua

## 4.4 GEOPROCESOS

Una vez finalizada la homogeneización de la información y teniendo constancia de que cumplen los requisitos que exige ArcGIS y este proyecto, se lleva a cabo una serie de geoprocesos, esto es el análisis y combinación de las capas de entrada para poder sacar nuevos resultados que ayuden al mejor entendimiento de las proyecto.

### 4.4.1 Capas derivadas de la altimetría

El objetivo de este apartado era poder representar la topografía del terreno de diferentes formas para su utilización en posteriores análisis. Para ello se partía de un MDT, con este ráster se crearon las siguientes capas:



## Pendiente

La pendiente<sup>10</sup> (en grados o en porcentaje) identifica el gradiente o tasa de cambio máximo en el valor  $z$  desde cada celda de la superficie del ráster a partir de los 8 vecinos más próximos. En la Figura 4.12 se muestra la capa obtenida.

## Orientación

La orientación<sup>11</sup> en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. La capa orientación se visualiza en la Figura 4.12:

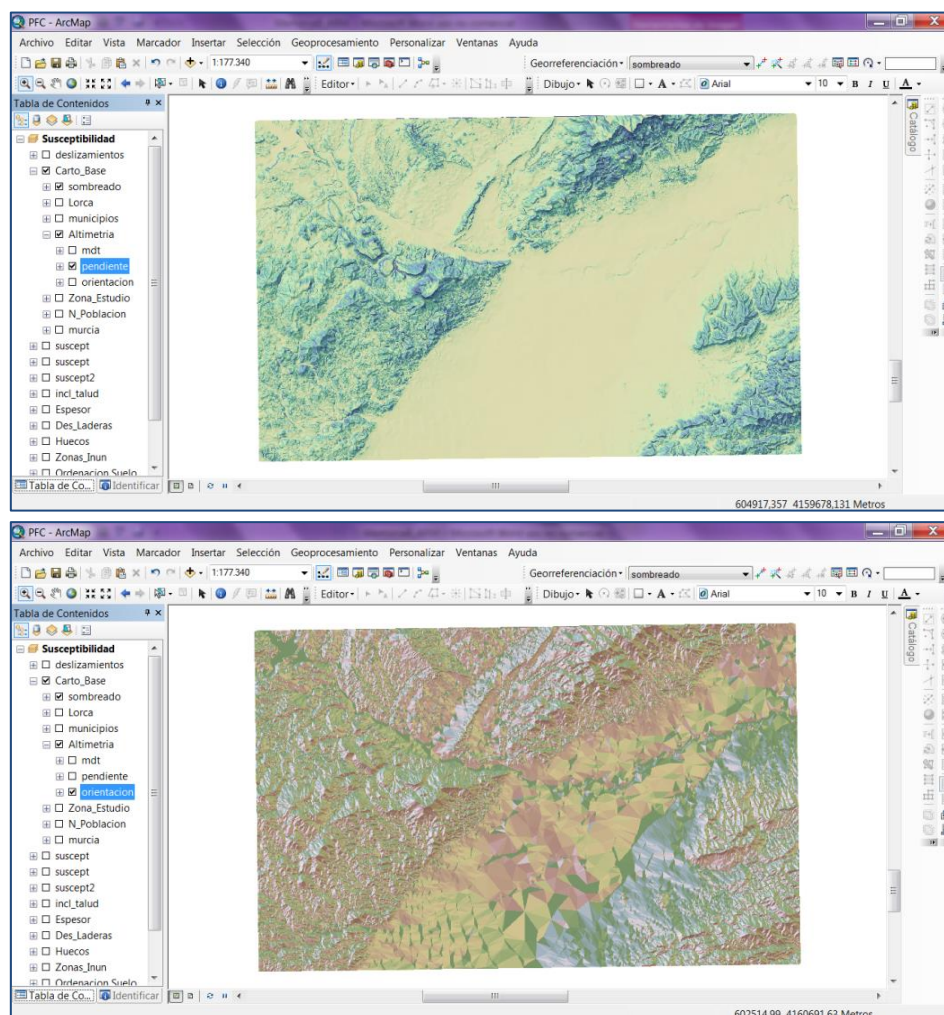


Figura 4.12. Visualización de la capa pendiente (arriba) y orientación (abajo) con ArcGIS

<sup>10</sup> *Spatial analyst tools > Superficie > Pendiente*

<sup>11</sup> *Spatial analyst tools > Superficie > Orientación*

#### 4.4.2 Cálculo del espesor del terreno

Se quiere obtener una capa ráster que represente el espesor del perfil del suelo. El espesor está condicionado a la pendiente del terreno, calculada en grados; cuanto más inclinado sea el terreno, menos profundo y viceversa. Teniendo en cuenta lo anterior, se emplea la capa de pendientes y la siguiente relación empírica para calcular<sup>12</sup> el espesor:

$$\text{Espesor (cm)} = 145.92 * e^{(-0.0454 * \text{Pendiente})}$$

A continuación, en la Figura 4.13, se muestra la capa de espesor del terreno en centímetros:

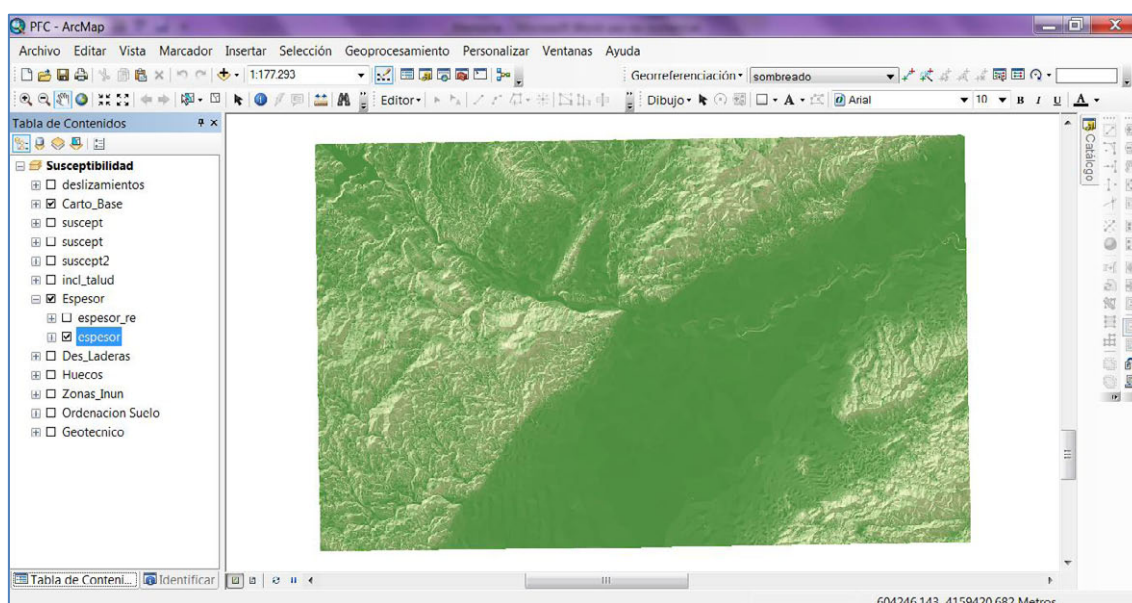


Figura 4.13. Capa de espesor del suelo visualizada en ArcGIS

#### 4.4.3 Capa de desnivel de las laderas

En este apartado se pretende representar mediante una capa ráster el desnivel existente en cada ladera de la zona de estudio. Para la obtención de la capa de desnivel se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Reclasificación de la capa de orientaciones para aislar las laderas. Se realizaron varias reclasificaciones para ver la variación de los resultados.

<sup>12</sup> *Spatial analyst tools > Álgebra de mapas > Calculadora ráster*

- a. 9 clases en intervalos de 40 grados
  - b. 18 clases en intervalos de 20 grados
  - c. 36 clases en intervalos de 10 grados
2. Transformación de las capas ráster reclasificadas a vectorial (polígonos)<sup>13</sup> y explosión<sup>14</sup> de los polígonos, para que todas las laderas tengan un identificador único.
3. Con ayuda del MDT y utilizando las funciones zonales máximo y mínimo<sup>15</sup> se obtuvieron dos capas ráster (por cada reclasificación del apartado a.) con los valores máximos y mínimos del terreno en cada ladera, en metros.
4. Mediante la calculadora ráster se restaron las capas de valor máximo y las de valor mínimo del terreno en cada ladera y se obtuvieron las capas finales de desnivel (Figura 4.14).

Si analizamos los tres resultados observamos que las laderas que se forman dependen de la reclasificación de la capa de orientaciones. Cuantas más clases se hagan más fiel será el resultado a la capa de orientaciones original. Por otro lado, la capa de orientaciones no es del todo realista para el cálculo de laderas debido a que la orientación en una ladera puede variar suavemente.

Finalmente, se toma como resultado final la capa des\_laderas1 obtenida de la reclasificación de la capa de orientaciones en 18 clases, ya que es la que más se asemeja a la realidad en la visualización de las mismas.

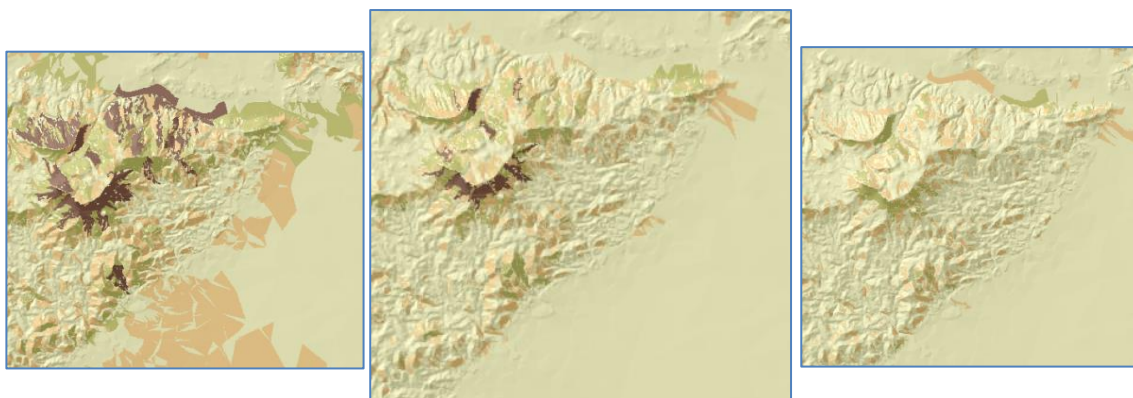


Figura 4.14. De izquierda a derecha, desnivel de laderas según la reclasificación de la capa orientación en 9, 18 y 36 clases

<sup>13</sup> Conversion tools > Desde ráster > De ráster a polígono

<sup>14</sup> Editor > Herramientas de edición > Edición avanzada > Expandir unidad multiparte

<sup>15</sup> Spatial analyst tools > zonal > Estadísticas zonales

#### 4.4.4 Conversión de capas vectoriales a ráster

Para poder realizar el cálculo de la susceptibilidad fue necesario unificar el formato de las capas que se emplean en dicho cálculo a formato ráster. Una pequeña minoría de ellas se encontraban ya en ese formato, como son: inclinación de taludes, espesor y ordenación del suelo. Sin embargo, hubo que convertir<sup>16</sup> a ráster las capas lineales de zonas inundables y las poligonales de huecos y mapa geotécnico. Todas las capas ráster obtenidas tienen la misma extensión, la de la zona de estudio y a las celdas sin datos (No Data) se les asignó el valor cero.

#### 4.4.5 Cálculo de la Susceptibilidad del terreno

Para comenzar este apartado, hay que hacer referencia a la metodología original desde la que se partió y que ha sido explicada en el Apartado 3.2.

A continuación se muestran las tablas modificadas (Tabla 4.5, Tabla 4.6, Tabla 4.7) en las que se han eliminado los factores que no se tuvieron en cuenta para el cálculo y aparecen los pesos que se han introducido en el *software* ArcGIS. Dichos pesos respecto a los originales han sido multiplicados por 10 para introducirse como números enteros. Para introducir los pesos se han reclasificado todas las capas ráster que representan los factores del cálculo de la susceptibilidad.

Tabla 4.5. Tabla modificada para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas en función de los factores topográficos.

FACTOR	INTERVALOS O 111 CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Inclinación de los taludes	Más de 45°	20	Estimar el valor medio. Úsese clinómetro
	35° a 45°	18	
	25° a 35°	14	
	15° a 25°	10	
	Menos de 15°	5	
Desnivel de laderas	Menos de 50 m	6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada.
	50a 100m	12	
	100 a 200 m	16	
	Más de 200 m	20	

<sup>16</sup> *Conversion tools > A ráster > Polilínea ráster*  
*Conversion tools > A ráster > Polígono a ráster*

Conclusiones y resultados al aplicar los pesos a los factores topográficos e históricos:

**Inclinación de Taludes.** Como resultado se obtuvieron valores que indicaban que cuanto mayor es la inclinación de los taludes, más influye en la determinación de la susceptibilidad. La mayoría de la zona de estudio tiene valores de pendiente por debajo de los 15 grados.

**Desnivel de Laderas.** Observando el desnivel de las laderas se concluye que la mayoría de ellas tienen un desnivel inferior a los 50m. Por lo tanto, las pocas zonas con gran diferencia de altitudes en las laderas contarán con un factor influyente a la hora de calcular la susceptibilidad.

Tabla 4.6. Tabla modificada para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas en función de los factores geotécnicos.

FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Tipos de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	15 a 25	Vulnerables a la erosión, suelos de consistencia blanda
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	12 a 20	
	Suelos arcillosos consistentes areno limosos compactos	5 a 10	Multiplicar por 1.3 si está agrietado
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes	5	Multiplicar por 1.2 a 1.5 según el grado de meteorización
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc).	3	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización
Espesor capa del suelo	Menos de 5 m	5	Revísense cortes y cañadas; o bien, recúrranse a exploración manual.
	5 a 10 m	10	
	10 a 15 m	14	
	15 a 20 m	18	



Conclusiones y resultados al aplicar los pesos a los factores geotécnicos:

**Tipo de Suelo o Roca.** Las clases del mapa geotécnico original no podían identificarse correctamente con las de la metodología que se emplea. Debido a esto, se hizo una asignación de pesos discretizada recomendada por Antonio Vazquez Hoehne que podemos visualizar en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Tabla de la modificación del mapa geotécnico Original respecto a la metodología empleada.

CLASES GEOTÉCNICAS (ORIGINAL)	CATEGORÍAS GEOTÉCNICAS (METODOLOGÍA)	ATRIBUTO RELATIVO
I	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	3
IIb	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes	5
IIIa	Suelos arcillosos consistentes areno limosos compactos	8
IIIb	Suelos arcillosos consistentes areno limosos compactos	10
IV	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	15
V	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	20
VI	Suelos granulares medianamente compactos o sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	25

La capa obtenida de la clasificación del suelo está compuesta en su mayoría por roca sedimentaria y suelos arcillosos que influye muy poco al cálculo de la susceptibilidad.

**Espesor.** Se observó que todos los espesores calculados anteriormente quedaban por debajo de 1.5m, quedando toda la zona de estudio incluida en el primer intervalo. Por ello, aunque se introdujo la variable espesor en el cálculo de la susceptibilidad, todo el territorio tiene asignado el mismo peso.

Tabla 4.8. Tabla modificada para la estimación de la susceptibilidad de deslizamientos de laderas en función de los factores geomorfológicos y ambientales

FACTOR	INTERVALOS O CATEGORÍAS	ATRIBUTO RELATIVO	OBSERVACIONES
Evidencias Geomorfológicas de hueco en laderas continuas	Inexistentes	0	Formas de conchas o de embudo (flujos)
	Volúmenes moderados	5	
	Grandes Volúmenes faltantes	10	
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	20	Considérense no solo la ladera sino también la plataforma de la cima
	Cultivos anuales	15	
	Vegetación Intensa	0	
	Vegetación moderada	8	
	Área deforestada	20	
Régimen del agua en ladera	Nivel freático superficial	10	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud
	Nivel freático inexistente	0	
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en ladera o la plataforma	10	

Conclusiones y resultados al aplicar los pesos a los factores geomorfológicos y ambientales:

**Evidencias Geomorfológicas de hueco en laderas continuas.** Una vez que se tuvieron todos los volúmenes calculados, se reclasificó la capa para poder diferenciar los volúmenes grandes de los pequeños y asignar así los pesos (atributo relativo). En vista a los resultados que se obtuvieron se llega a la conclusión, que la influencia que tienen los huecos a la hora de calcular la susceptibilidad, será grande y en muy pocos lugares.

**Vegetación y uso de la tierra.** Analizando los pesos aplicados a este apartado, se puede decir, que las zonas de mayor influencia (zona urbana y área deforestada) van a ser aquellos lugares en donde escasea la vegetación y en consecuencia, el agua de lluvia correrá con mayor fluidez. Si se analizan los resultados, se observa que la mayoría de la zona de estudio tiene zonas con poca influencia, sobretodo se da la existencia de cultivos anuales.

**Régimen del agua en ladera.** Uniendo la capa de Zonas Inundables y reclasificando, según la tabla de la metodología propuesta, se obtuvo el Régimen del Agua en la ladera.

Finalmente, una vez calificados los diferentes factores que influyen en la estabilidad de una ladera, se procedió a realizar la sumatoria de todos los atributos relativos (pesos), a fin de estimar el grado de susceptibilidad de deslizamiento que pudiese adjudicársele a una ladera.

En la Tabla 4.9 se distinguen cinco grados de esa susceptibilidad, desde la muy baja hasta la muy alta.

Tabla 4.9. Tabla original para la estimación del grado de susceptibilidad de deslizamiento

GRADO	DESCRIPCIÓN	SUMA DE LAS CALIFICACIONES
5	Susceptibilidad muy alta	Más de 100
4	Susceptibilidad alta	85 a 100
3	Susceptibilidad moderada	70 a 85
2	Susceptibilidad baja	50 a 70
1	Susceptibilidad muy baja	Menos de 50

Para un mayor entendimiento de los procesos anteriores, a continuación se muestra el diagrama de flujo diseñado en este trabajo.

Los cuadros de colores engloban las clases del diagrama que forman parte del mismo módulo del proyecto. Se observa que hay tres módulos claramente diferenciados y relaciones entre las diferentes clases de los módulos.

1. El primer módulo (amarillo) corresponde a la información de partida donde se exponen todas las capas que han intervenido en el cálculo de la susceptibilidad.
2. El segundo módulo (naranja) son las capas intermedias calculadas o creadas para poder obtener las capas finales que se emplean para el cálculo de la susceptibilidad.
3. En el tercer módulo (rojo) se contemplan todos los factores que han intervenido en su cálculo como son la inclinación del talud, espesor, desnivel de laderas, agua en laderas, huecos, usos del suelo reclasificados, antecedentes y tipo de suelo.



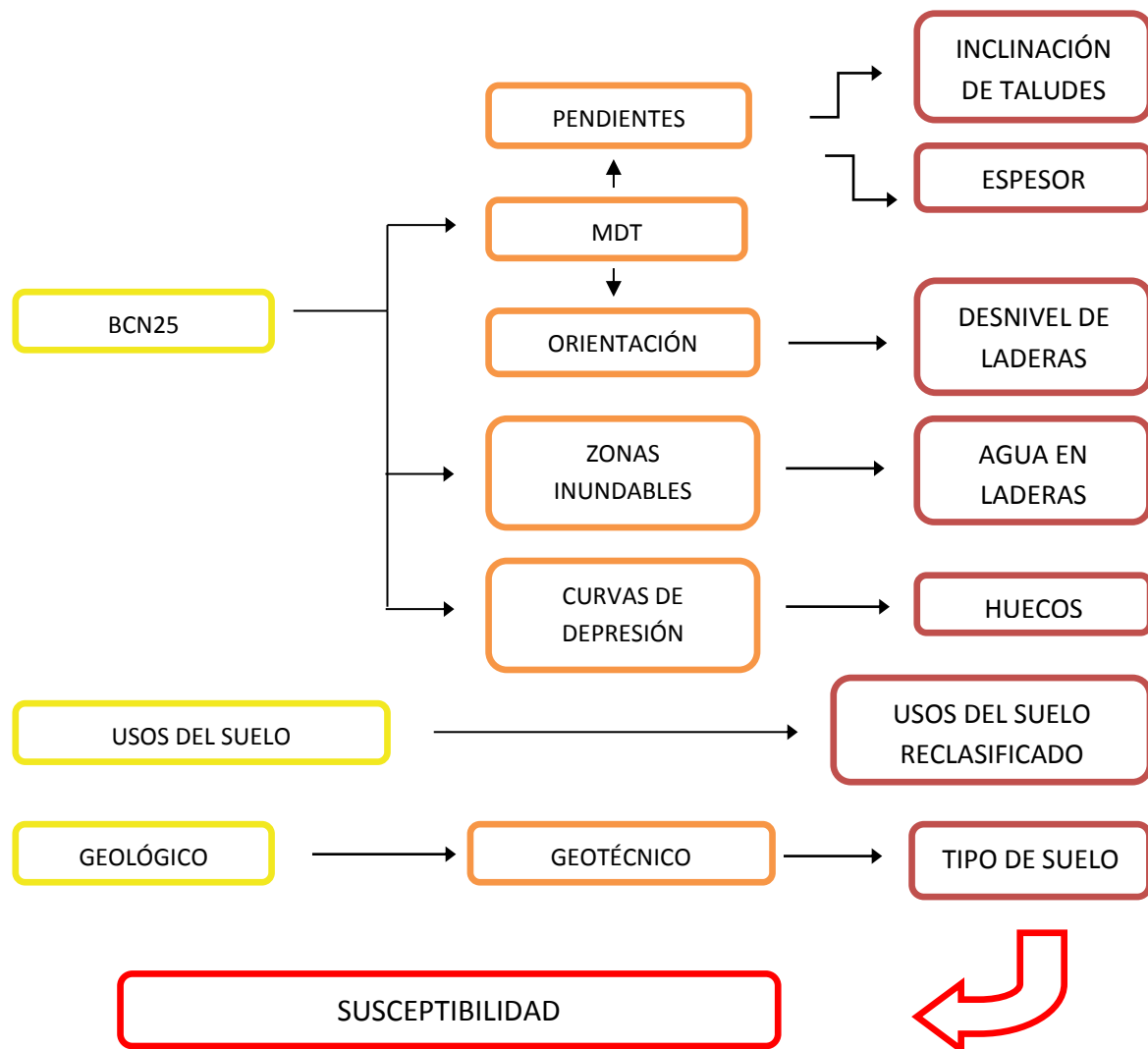


Figura 4.15. Diagrama de flujo para el cálculo de la Susceptibilidad

En el siguiente capítulo, se puede observar el mapa final de la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de ladera así como los mapas finales de cada uno de los factores que intervinieron en el cálculo de la susceptibilidad se encuentran adjuntos a la memoria.

## 5 DISEÑO CARTOGRÁFICO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez integrada y combinada la información de partida, el último paso será analizar los resultados obtenidos. Para mejorar esta interpretación de los resultados y de la información almacenada se ha diseñado una simbolización cartográfica tanto en la información temática como en la cartografía básica que localizará dichos resultados.

En este tema se analizará de forma conjunta los resultados obtenidos y la simbología que se ha elegido para su representación de acuerdo con la naturaleza del propio resultado. Este análisis conjunto permitirá entender mejor la distribución geográfica de este y su interacción con otros factores.

### 5.1 DISEÑO CARTOGRÁFICO

Un mapa es una representación abstracta y limitada del mundo. La herramienta que utiliza la cartografía para abstraer dicha realidad son las diferencias gráficas de los elementos visuales que están contenidos en el mapa. Para establecer esas diferencias se utilizan las variables visuales. El conocimiento y entendimiento de las variables visuales son la clave para realizar una correcta representación cartográfica, estas variables son:

- Posición. Situación X e Y del punto. La Posición es una variable que no puede utilizarse en cartografía pues los objetos tienen la suya propia.
- Forma. Figura o determinación exterior que distingue al signo (puntual, lineal y superficial).
- Orientación. Los símbolos pueden mostrarse con diferentes orientaciones para indicar varias circunstancias de un mismo fenómeno (puntual, lineal y superficial).
- Color. Descrito de acuerdo a sus tres coordenadas:
  - Tono. Longitud de onda que define el color

- Valor. Cantidad de luz reflejada por el color
- Saturación. Pureza o intensidad de un color
- Tamaño. Dimensión del símbolo. Pueden observarse diferencias cuantitativa
- Textura. Ampliación/disminución fotográfica del relleno de una estructura visible o trama aplicada al relleno de un elemento. Su aplicación es difícil y además su lectura genera cierta confusión

Dichas variables se caracterizan por sus propiedades: asociativa (igual importancia), selectiva (diferenciación de grupos), ordenada (orden específico) y cuantitativa (orden mediante una cantidad).

Una vez identificadas las variables visuales que representen una información del modo más oportuno, el siguiente paso será utilizar esas variables visuales con las técnicas cartográficas apropiadas para el correcto entendimiento.

## 5.2 RESULTADOS INTERMEDIOS

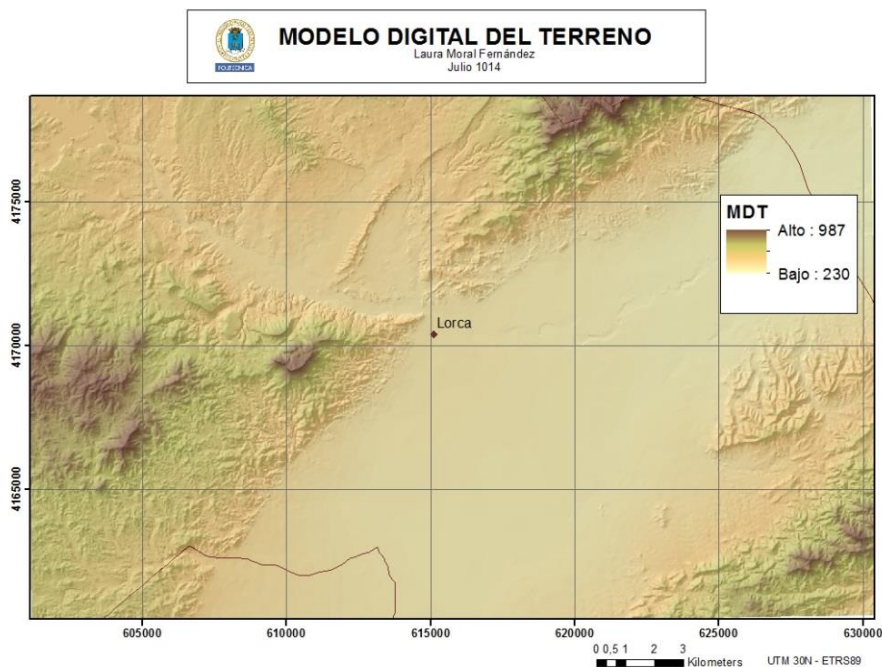
La susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de ladera ha sido obtenida a partir de varios factores: factores topográficos e históricos, factores geotécnicos y factores geomorfológicos y ambientales. Estos factores a su vez han sido obtenidos mediante modificaciones y combinaciones de la información de partida.

A continuación, se muestra un listado en el que aparecen los mapas finales de los factores que intervinieron en el cálculo de la susceptibilidad. También se han incluido en el listado algunos mapas con información relevante para el proyecto.

1. Mapa del Modelo Digital de Terreno
2. Mapa de Orientaciones
3. Mapa de Inclinación de Taludes
4. Mapa de Desnivel de Laderas
5. Mapa de Régimen de Agua en Laderas
6. Mapa de Evidencias Geomorfológicas de Hueco en laderas
7. Mapa de Vegetación y Uso de la Tierra
8. Mapa de Tipos de Suelo o Rocas

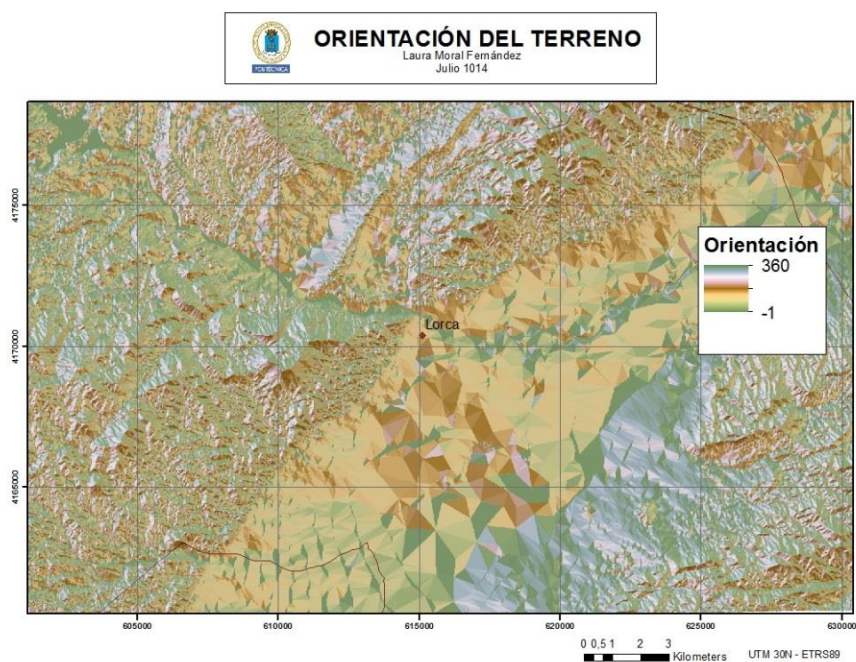
Los mapas del listado se encuentran explicados a continuación:

### Mapa del Modelo Digital del Terreno (MDT)



La zona de estudio tiene una diferencia de altura aproximada de 750 metros. En la zona central y con dirección noreste el relieve topográfico se caracteriza por tener una amplia llanura. La ciudad de Lorca se localiza en la zona centro-norte de dicha llanura, justo en la desembocadura del río Guadalentín.

### Mapa de Orientaciones

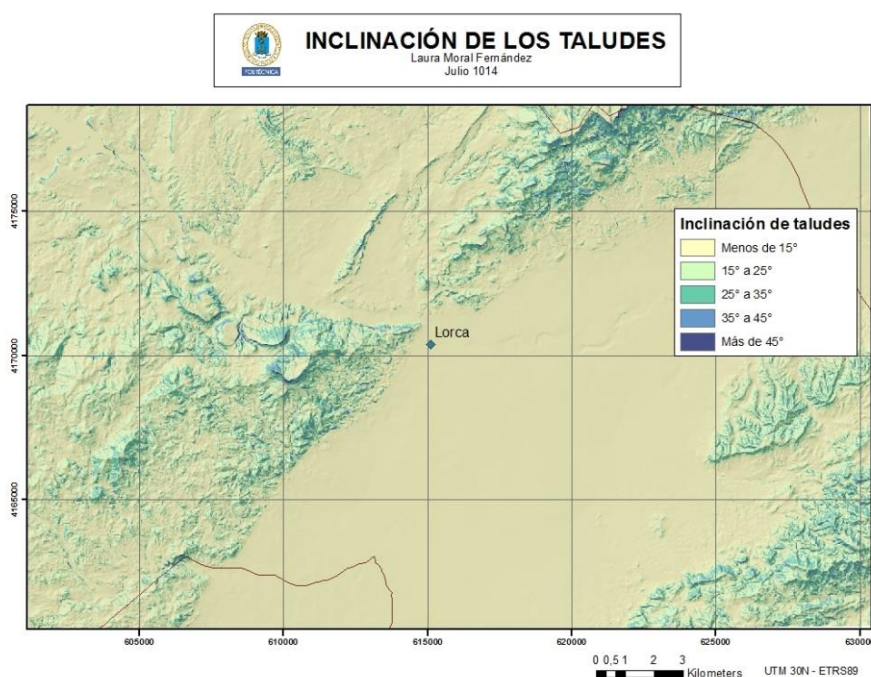


Los valores que toma la orientación del terreno van de 0 a 360 grados y la simbología está asignada de tal forma que el terreno varía de color en función de si las laderas se orientan al norte (verde), sur (marrón), este (amarillo) u oeste (morado). Con este mapa se distinguen de forma clara las vaguadas y divisorias, al igual que, las laderas en las que se divide la zona de estudio. Como podemos observar las grandes laderas que se forman en la desembocadura del río Guadalentín están orientadas al este.

#### MAPAS FINALES DE LOS FACTORES QUE INTERVINIERON EN EL CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD:

##### Mapa de Inclinación de Taludes

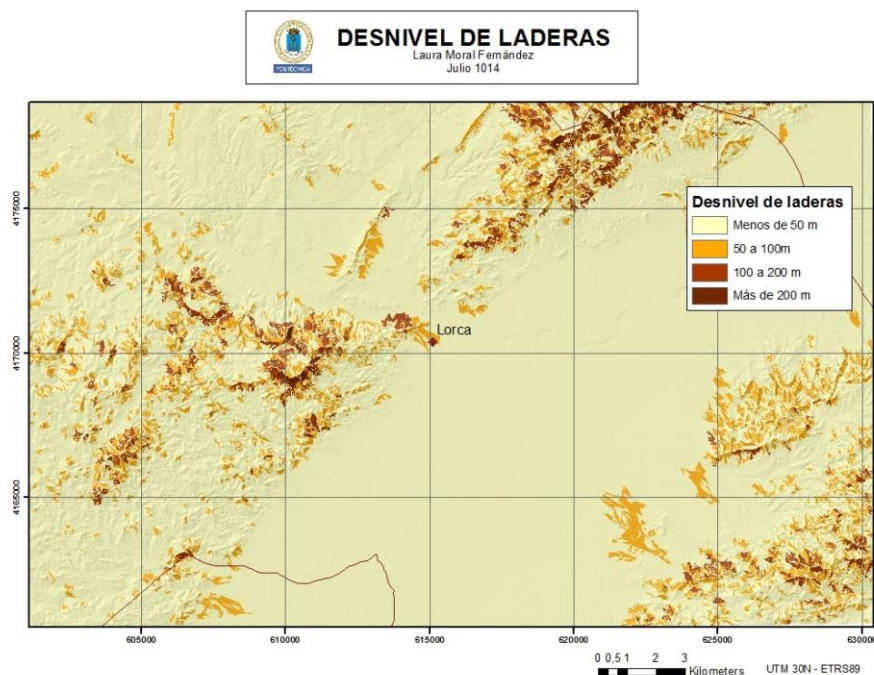
La Inclinación de taludes o pendiente es un factor topográfico que influye en el cálculo de la susceptibilidad. Como valor máximo toma 88 grados, algo inusual debido a que la mayoría del terreno tiene una pendiente menor de 15 grados. Las zonas de mayor pendiente se encuentran en una diagonal que atraviesa la zona de estudio de suroeste a noreste y la ciudad de Lorca se sitúa en una superficie prácticamente llana.



##### Mapa de Desnivel de Laderas

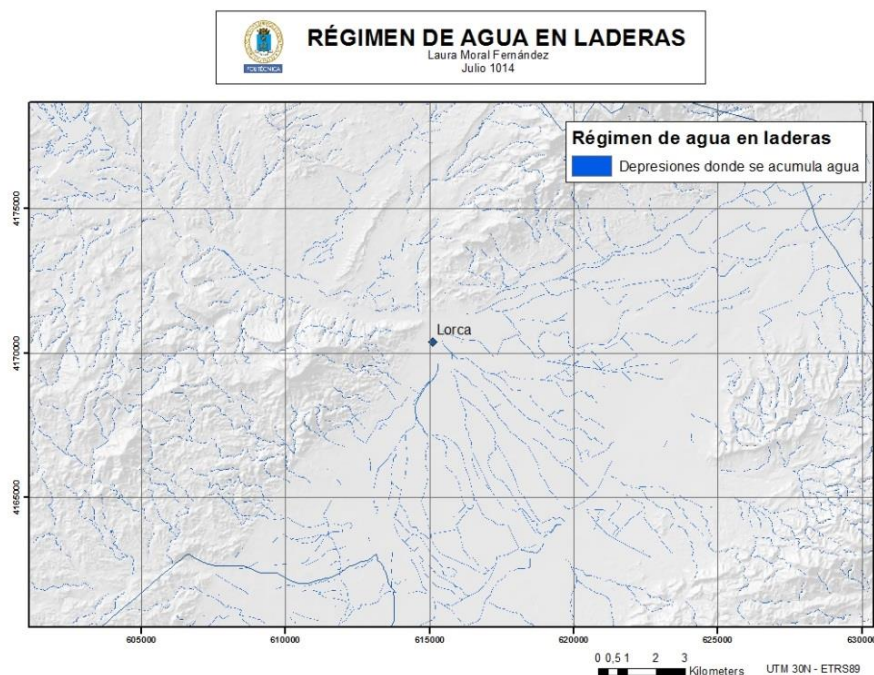
El desnivel de laderas, calculado a partir del mapa de orientaciones y el Modelo Digital del Terreno (MDT), constituye el último de los factores topográficos para el cálculo de la susceptibilidad. En el mapa se observa que las laderas con mayor desnivel se encuentran en zonas de mucha pendiente, a pesar de que la superficie de la ladera sea menor. Sin embargo, existe un número mucho mayor de laderas con desniveles menores de los 50 metros.





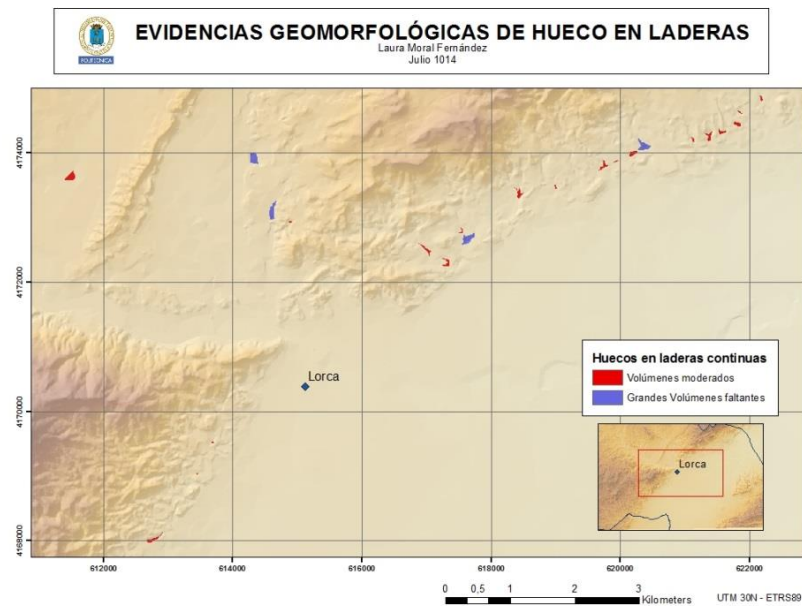
### Mapa de Régimen Agua en Laderas

El factor geomorfológico y ambiental llamado régimen de agua en las laderas afecta casi a toda la zona de estudio. Se encuentra disperso en pequeñas depresiones donde se acumula el agua y que por lo tanto son más susceptibles a sufrir deslizamientos de ladera.



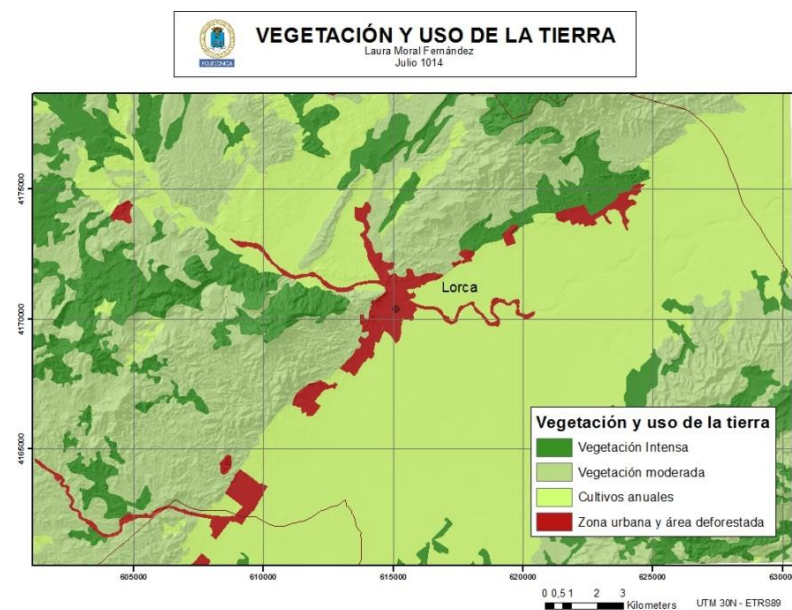
## Mapa de Evidencias Geomorfológicas de Hueco en Laderas

Solamente existen 40 evidencias geomorfológicas de hueco en laderas de la zona de estudio y se encuentran agrupadas en el centro de la misma bordeando el límite noreste de la desembocadura del río Guadalentín. Por ello, no afectan casi la susceptibilidad del terreno.



## Mapa de Vegetación y Uso de la Tierra

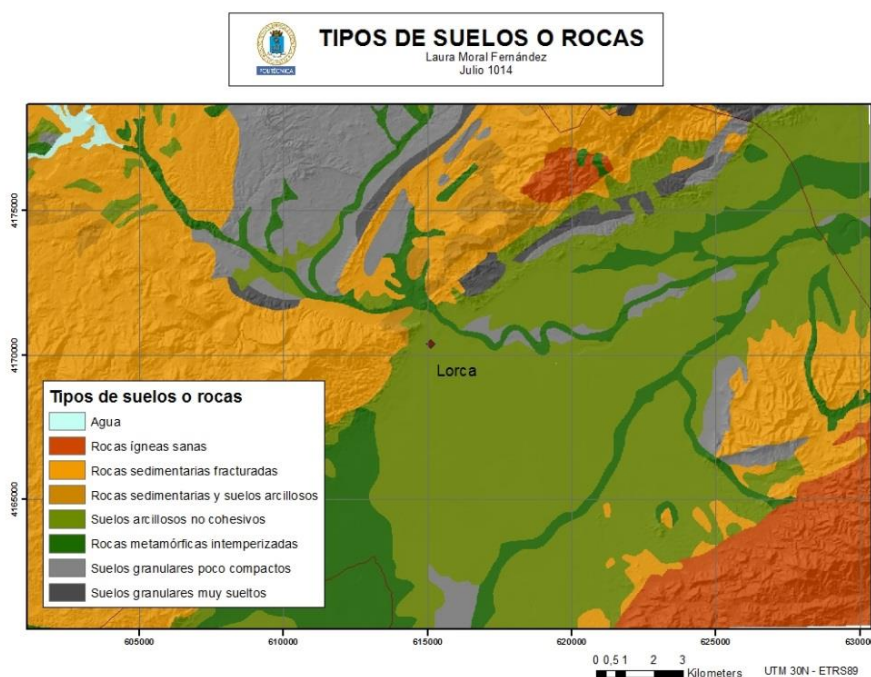
La mayor parte de la zona de estudio está calificada como terreno para cultivos anuales, exceptuando zonas de mayor altitud. Sin embargo, las zonas más susceptibles son de carácter urbano o deforestado donde se incluye la ciudad de Lorca.





### Mapa de Tipos de Suelo o Rocas

Existe una gran variedad de suelo o rocas en la zona de estudio, predominando las rocas metamórficas intemperizadas de la desembocadura del río Guadalentín. Los suelos granulares muy sueltos son los que más influyen, como factor geotécnico, en el cálculo de la susceptibilidad y se localizan al norte de la zona de estudio.



## 5.3 SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO

La metodología empleada para realizar el estudio clasifica la susceptibilidad en cinco grados (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta). Atendiendo a esta clasificación, se obtuvo el mapa de susceptibilidad donde se puede advertir con claridad las diferentes zonas de distinta susceptibilidad. La mayoría de la zona de estudio tiene una susceptibilidad muy baja, baja o moderada a sufrir deslizamientos de ladera.

Es necesario aclarar que existen solo dos celdas que están catalogadas con susceptibilidad moderada. Este resultado se localiza en el límite norte de la zona de estudio y se debe a que los valores de las capas ráster en los extremos no son calculados correctamente.

Respecto a la cartografía, la variable viene representada de forma cuantitativa mediante mapas de coropletas, puesto que es un método de representación cartográfica que distribuye tramas y colores (ICA).

En el **Mapa de Susceptibilidad** se observa que la mayoría de la zona de estudio tiene susceptibilidad muy baja. Sin embargo, se han identificado cinco zonas con diferentes combinaciones de pesos que conllevan susceptibilidad baja y moderada:

- Zona 1 (Z1): Está compuesta principalmente por dos regiones; una situada al noreste, en el límite de la zona de estudio, y otra al este. El incremento de la susceptibilidad, de muy baja a baja, se debe a la influencia de los factores topográficos. Y sobre todo, a las características geotécnicas (suelo granular). Sin embargo, la vegetación es moderada y no permite que la susceptibilidad tenga mayor grado.
- Zona 2 (Z2). En la región noreste, donde se pueden identificar pequeñas islas de terreno con susceptibilidad moderada, debido a un aumento del peso de los factores topográficos.
- Zona 3 (Z3): Se trata de grandes superficies repartidas en zonas de poca altitud donde el suelo es granular y coincide con cultivos anuales, una zona urbana o un área deforestada. Esto aporta un crecimiento de la susceptibilidad que junto al peso asignado a los factores topográficos conlleva una susceptibilidad baja.
- Zona 4 (Z4): La zona 4 representa todas las franjas con forma sinuosa repartidas por la zona de estudio. Estas se forman por grandes inclinaciones de los taludes y por la acumulación de aguas en las laderas. Lo que supone una susceptibilidad baja.
- Zona 5 (Z5): Como se puede observar los factores menos influyentes en la variación de la susceptibilidad son el espesor y las evidencias geomorfológicas de huecos en laderas. Esto se debe a que el espesor toma el mismo peso en toda la zona de estudio y que hay pocos huecos y están distribuidos en una zona de muy baja susceptibilidad. No obstante, se han encontrado dos regiones pequeñas con susceptibilidad baja en las que el peso asignado al factor geomorfológico es máximo y el geotécnico alto.

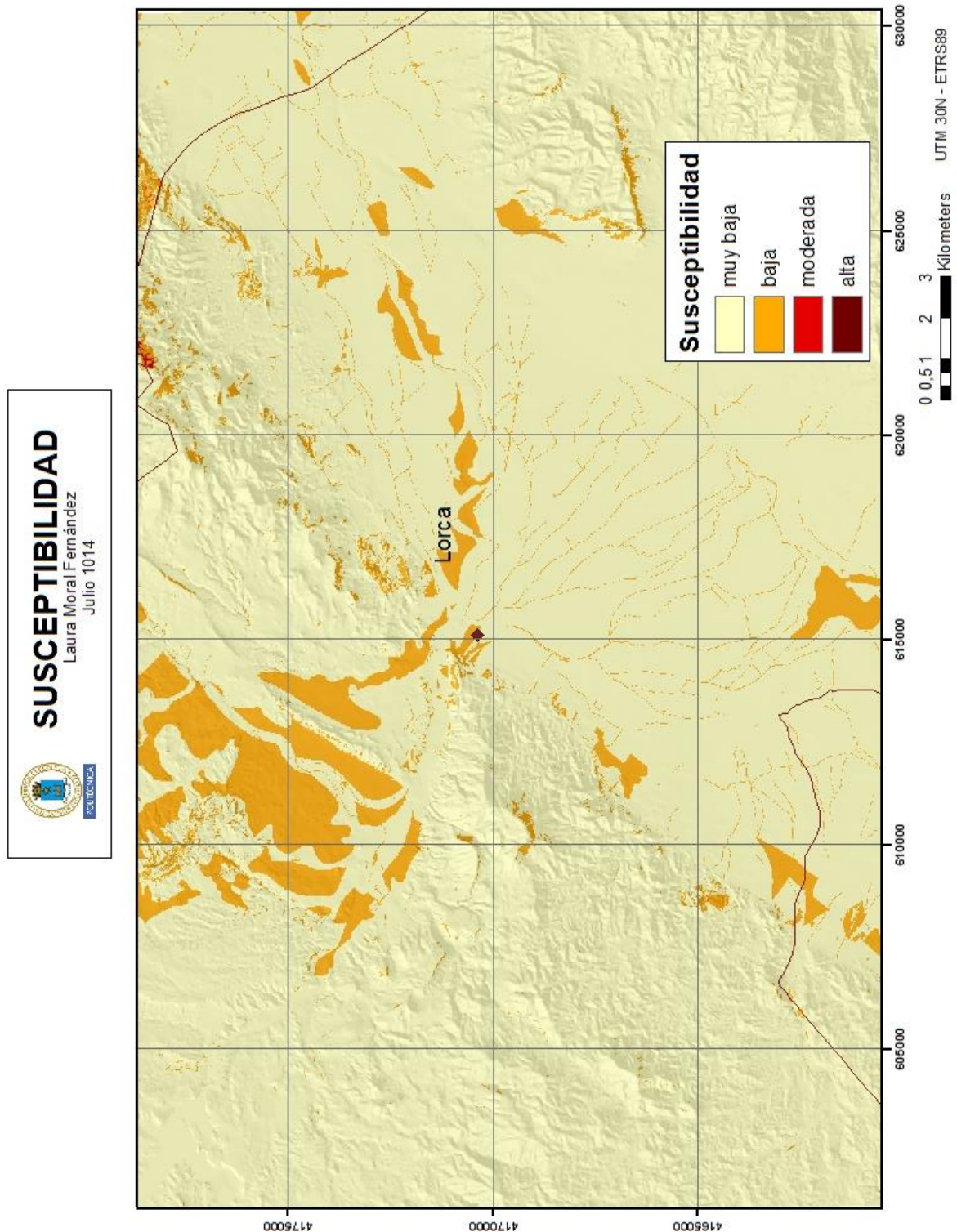
En la Tabla 5.1 se puede ver un ejemplo del peso asignado a cada capa que interviene en el cálculo de la susceptibilidad según la zona.

Tabla 5.1. Ejemplo de asignación de pesos en cada zona identificada y analizada.

FACTORES SUSCEPTIBILIDAD	CAPA SIG	PESO O ATRIBUTO RELATIVO				
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Inclinación en Taludes	incl_talud	18	20	5	5	5
Espesor	Espesor_re	5	5	5	5	5
Desnivel de Laderas	d_laderas	16	20	6	6	6
Agua en Laderas	z_inun_re	0	0	0	10	0
Evidencias geomorfológicas de huecos	huecosR2	0	0	0	0	10
Vegetación y uso de la tierra	usuelo_recl	8	8	20	15	15
Tipos suelos o Rocas	geotecnico_re	20	25	20	15	20
SUSCEPTIBILIDAD	suscept	62	78	56	56	61

Principalmente, se han sacado las siguientes conclusiones acerca de la muy baja susceptibilidad de la zona de estudio:

- El espesor del suelo es muy pequeño y homogéneo en toda la zona de estudio, es decir, el peso que aporta este factor es el mínimo y el mismo en toda la región.
- Las zonas con suelo granulado o rocas metamórficas que además coinciden con un área urbana, zona deforestada o cultivo anual consiguen un incremento de la susceptibilidad. A pesar de ello, suelen ser zonas con poca influencia de los factores topográficos. Lo que conlleva un estancamiento del grado de susceptibilidad.
- También se da la situación contraria, pero de igual efecto. Zonas con baja susceptibilidad influidas casi en su totalidad por los factores topográficos.
- La presencia de evidencias geomorfológicas de huecos en laderas en la zona de estudio es casi inexistente y se encuentra en una zona en la cual la susceptibilidad es casi nula.
- La acumulación de aguas en ladera sí que afecta a la susceptibilidad, pero al ser un factor disperso no afecta a una zona en concreto.



Para una mejor valoración de la susceptibilidad de la zona se obtuvo el **Mapa de Susceptibilidad Pormenorizada**. La susceptibilidad se clasificó en cinco intervalos: [16-30), [30-44), [44-58), [58-88]. Gracias a ello, se puede ver claramente cuáles son las zonas de mayor y menor susceptibilidad y a que factores se debe este resultado.

Esta representación tiene una gran influencia del mapa geotécnico, se pueden distinguir las zonas donde el suelo tiene características geotécnicas que favorecen la susceptibilidad. Sucede lo mismo con el mapa de ordenación del suelo, se puede ver la forma de la ciudad de Lorca, clasificada como área urbana, en el centro del mapa.

No obstante, también llama la atención la influencia de los factores topográficos, sobretudo el de inclinación de los taludes. Las zonas con valores máximos de estos factores tienen la mayor susceptibilidad.

Finalmente, se ha combinado este mapa con los deslizamientos de ladera producidos por el terremoto de Lorca de 2011 para poder evaluar la metodología empleada. Mediante el uso de la herramienta *extraer valores múltiples a puntos* y la generación de gráficos se concluye que la localización de los deslizamientos coincide en su mayoría con zonas de susceptibilidad baja (Figura 5.1).

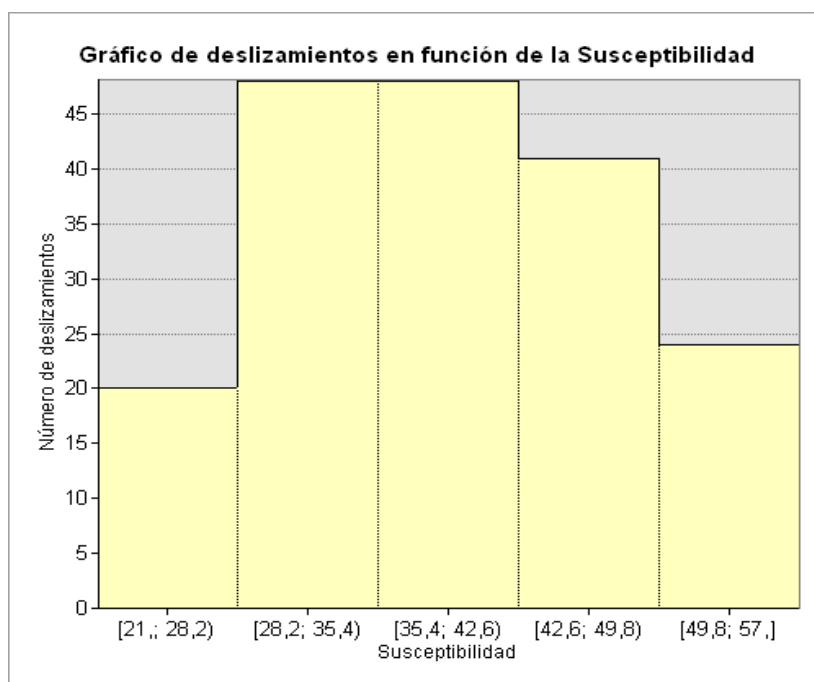


Figura 5.1. Gráfico: Número de deslizamientos de ladera en función de la Susceptibilidad.

La mayoría de localizaciones de los desplazamientos se caracterizan por una susceptibilidad compuesta por:

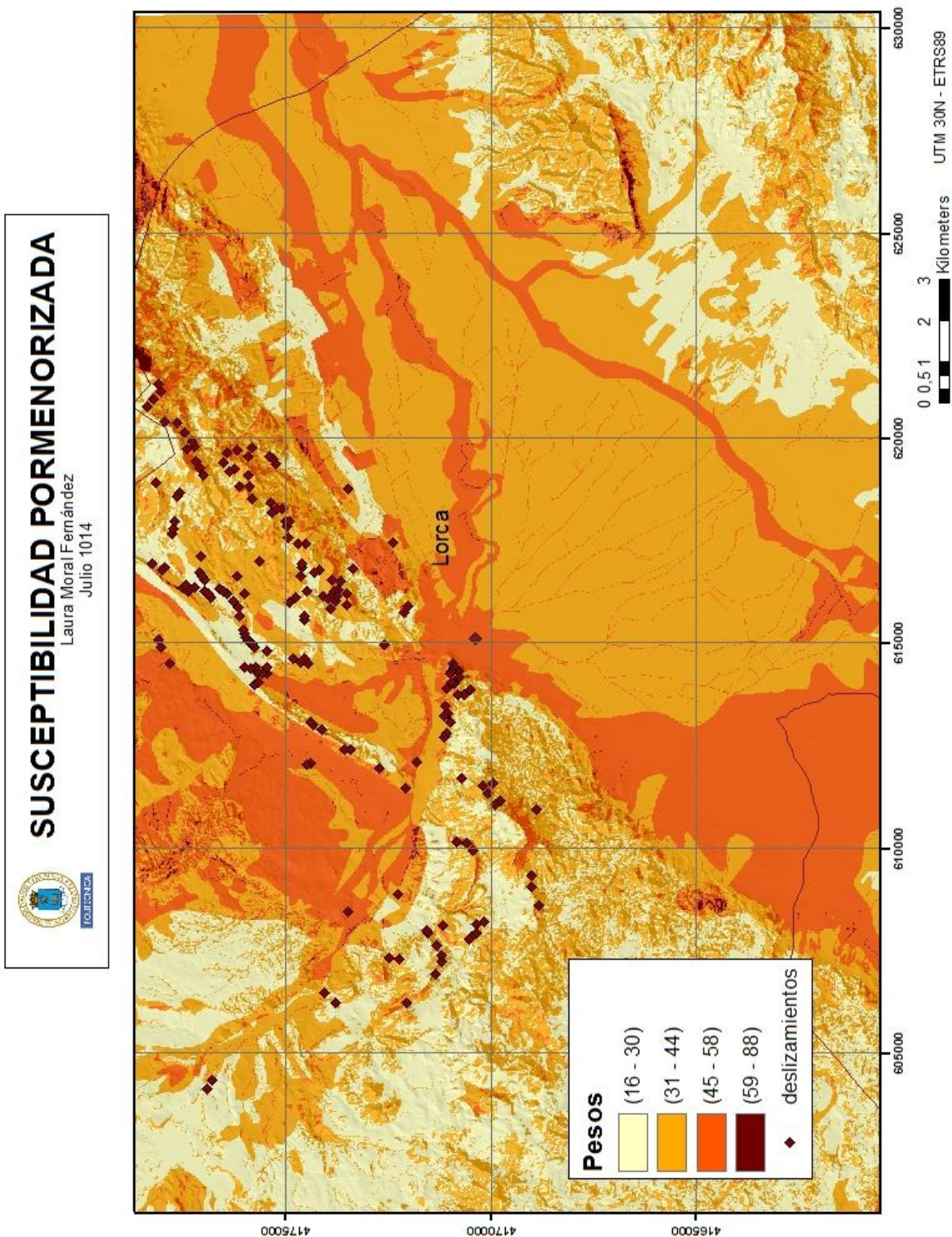
- Inclínación de los taludes menor de 15 grados (peso = 5).
- Espesor menor de 5 metros (peso = 5).
- Desnivel de laderas menor de 50 metros (peso = 6).
- Inexistencia de agua en laderas (peso = 0).
- Inexistencia de evidencias geomorfológicas de huecos en laderas (peso = 0).
- Vegetación moderada (peso = 8).
- Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes (peso = 5).

El valor del peso total en la mayoría de casos es 29. También se ha observado que la mayor susceptibilidad alcanzada es de grado 2, baja, donde la suma de los pesos es de 57. A continuación se detalla la suma de pesos en el caso más favorable:

- Inclínación de los taludes de 35 a 45 grados (peso = 18).
- Espesor menor de 5 metros (peso = 5).
- Desnivel de laderas entre 100 y 200 metros (peso = 16).
- Inexistencia de agua en laderas (peso = 0).
- Inexistencia de evidencias geomorfológicas de huecos en laderas (peso = 0).
- Vegetación moderada (peso = 8).
- Suelos arcillosos consistentes areno limosos compactos (peso = 10).

Con todo lo analizado, se concluye que la zona de estudio tiene una susceptibilidad baja. Sin embargo, pueden producirse deslizamientos de ladera debido al impacto del factor detonante.







## CONCLUSIONES

Se describen a continuación las conclusiones más relevantes respecto a la herramienta SIG diseñada y utilizada en este trabajo.

- Se considera imprescindible la elaboración previa de un organigrama de trabajo donde figuran los datos de partida necesarios, el objetivo final y la estructura o fases del proyecto a desarrollar.
- Los Sistemas de Información Geográfica son imprescindibles para depurar, homogeneizar y georreferenciar la información espacial disponible.
- El análisis de las diferentes variables del proyecto requiere el diseño de una herramienta SIG específica y *"a medida"*, integrando y particularizando los datos y procesos propios de la evaluación de estas variables.
- En los estudios en que se maneja información geográfica, la adquisición de los datos suele ser una tarea ardua. No obstante, se espera que la creación de Infraestructuras de Datos Espaciales pueda ir solventando este problema.
- Del mismo modo, el SIG proporciona una infraestructura de datos espaciales que constituye un conjunto de información de gran valor para sucesivos proyectos.

Los análisis que se han realizado sobre los resultados obtenidos de la recopilación y desarrollo de información, relacionada con la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en la zona de estudio, se concluyen en los siguientes puntos:

- La metodología propuesta no es única y debería revisarse regionalmente en base a las experiencias pasadas y futuras de deslizamientos.
- En el mapa de susceptibilidad, resultado final, se muestra la importancia y relevancia que guardan las características geotécnicas de los materiales que componen las laderas. Influyen también los rasgos topográficos y la vegetación y usos de la tierra.

## DESARROLLOS FUTUROS

Una vez concluido este trabajo y con la experiencia adquirida en el mismo, se plantean un conjunto de desarrollos y líneas futuras de trabajo que podrían contribuir a completar y mejorar el estado del arte en la materia.

Hay que resaltar las posibilidades que presentan estas técnicas en la gestión de la emergencia ante eventuales futuras catástrofes, en relación con estos riesgos.

Dentro de la utilización de sistemas de información geográfica, se considera de especial importancia seguir apostando por la gestión y desarrollos de bases de datos completas, con información precisa y de calidad, y en formatos estándar que sirvan de punto de partida a proyectos futuros.

Otra línea que se considera muy importante en los SIG es la automatización de procesos, que puede ayudar a implementar de modo casi automático las metodologías diseñadas, así como adaptarlas a otras zonas de trabajo o a otros escenarios. La automatización facilita al mismo tiempo las actualizaciones sucesivas de los estudios que se realicen, sin más que cambiar las capas de información que requieran revisiones.

Sería interesante analizar la peligrosidad y riesgo de deslizamientos de zona de estudio considerando diversos detonantes: escenarios sísmicos y pluviales probabilistas y deterministas, que permita hacer una valoración del riesgo de deslizamiento ante una situación de emergencia.

También sería interesante que este tipo de estudios realizados sirviesen para complementar los planes de ordenación territorial y de emergencia de los Ayuntamientos y si ocurriera un fenómeno mayor que el analizado en este estudio, se pudiera hacer una valoración previa de las zonas en riesgo y las potenciales infraestructuras afectadas.

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

FIGURA 2.1. ESQUEMA DE UNA LADERA AFECTADA POR UN DESLIZAMIENTO DE LADERA. (WWW.MONOGRAFIAS.COM).....	7
FIGURA 2.2. MAPA DE SITUACIÓN DE LORCA, REGIÓN DE MURCIA (WWW.FINANZZAS.COM) .....	9
FIGURA 2.3. MAPA CON LA EXTENSIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN LA REGIÓN DE MURCIA (UTM30N- ETRS89).....	10
FIGURA 3.1. ESQUEMA RELACIONAL DE LOS DIFERENTES CONCEPTOS PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO DE DESLIZAMIENTO.....	12
FIGURA 4.1. IZQ. LA CAPA DE MUNICIPIOS. A LA DERECHA, LA CAPA DE NÚCLEOS DE POBLACIÓN.....	20
FIGURA 4.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT).....	21
FIGURA 4.3. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT). MDT.SHP.....	21
FIGURA 4.4. ESQUEMA DEL TRATAMIENTO DE DATOS REALIZADO PARA OBTENER LOS DATOS DE ESTRADA REFERENTE A LOS DESLIZAMIENTOS DE LADERA.....	22
FIGURA 4.5. DESLIZAMIENTOS.SHP.....	22
FIGURA 4.6. ARRIBA LAS CAPAS CURVAS_DEPRESION.SHP Y PTOS_ACO_DEPRESION.SHP. ABAJO LA CAPA ZONAS_INUNDABLES.SHP.....	24
FIGURA 4.7. VISUALIZACIÓN DE LA CAPA GEOTÉCNICO_ZONA.SHP.....	25
FIGURA 4.8. VISUALIZACIÓN DE LA CAPA USOS_SUELO.SHP.....	26
FIGURA 4.9. VISUALIZACIÓN EN ARCGIS DE LA CAPA POLÍGONOS DE DEPRESIÓN.....	28
FIGURA 4.10. VISUALIZACIÓN EN ARCGIS DE LA CAPA GEOTÉCNICO_ZONA.SHP RECLASIFICADA.....	29
FIGURA 4.11. CAPAS OBTENIDA DE UN PROCESO DE EDICIÓN Y RECLASIFICACIÓN: USUELO_RECL.SHP.....	29
FIGURA 4.12. VISUALIZACIÓN DE LA CAPA PENDIENTE (ARRIBA) Y ORIENTACIÓN (ABAJO) CON ARCGIS.....	31
FIGURA 4.13. CAPA DE ESPESOR DEL SUELO VISUALIZADA EN ARCGIS .....	32
FIGURA 4.14. DE IZQUIERDA A DERECHA, DESNIVEL DE LADERAS SEGÚN LA RECLASIFICACIÓN DE LA CAPA ORIENTACIÓN EN 9, 18 Y 36 CLASES .....	33
FIGURA 4.15. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD.....	39
FIGURA 5.1. GRÁFICO: NÚMERO DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN FUNCIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD. .....	50

## TABLAS

TABLA 3.1. TABLA ORIGINAL DEL MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS CONSIDERANDO LOS FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS. ...	13
TABLA 3.2. TABLA ORIGINAL DEL MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS CONSIDERANDO LOS FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES. ....	13
TABLA 3.3. TABLA ORIGINAL DEL MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS CONSIDERANDO LOS FACTORES GEOTÉCNICOS. ....	14
TABLA 4.1. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS CAPAS DE INTERÉS DE LA BASE CARTOGRÁFICA NACIONAL (BCN). ....	23
TABLA 4.2. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE HUECOS. ....	27
TABLA 4.3. RECLASIFICACIÓN DEL MAPA GEOTÉCNICO. ....	28
TABLA 4.4. RECLASIFICACIÓN DEL MAPA ORIGINAL DE USOS DEL SUELO EN 5 CATEGORÍAS. ....	30
TABLA 4.5. TABLA MODIFICADA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES TOPOGRÁFICOS. ....	34
TABLA 4.6. TABLA MODIFICADA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES GEOTÉCNICOS. ....	35
TABLA 4.7. TABLA DE LA MODIFICACIÓN DEL MAPA GEOTÉCNICO ORIGINAL RESPECTO A LA METODOLOGÍA EMPLEADA. ....	36
TABLA 4.8. TABLA MODIFICADA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES. ....	37
TABLA 4.9. TABLA ORIGINAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO. ....	38
TABLA 8.1. EJEMPLO DE ASIGNACIÓN DE PESOS EN CADA ZONA IDENTIFICADA Y ANALIZADA. ....	48

## REFERENCIAS

**ALCANTARA AYALA, IRASEMA.** Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Invest. Geog [online]. 2000, n.41, pp. 7-25. ISSN 0188-4611.

**AYALA, C. F. J. Y COROMINAS, J (2003);** Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas de SIG: fundamentos y aplicaciones en España.

**CENAPRED (2004A).** Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y Riesgos. México. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Pp. 385

**CRUDEN, D. M. (1991);** A Simple Definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 43; pp. 27- 29.

**ECHARRI P. L. (1998);** Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Editorial Teide.

**GARCÍA, M.J. (2008);** Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos; 323 páginas; Universidad de Alcalá, Facultad de Ciencias, departamento de Matemáticas.

**LAÍN, H. L. (1999).** Geographic information systems.

**LAÍN, H. L. (2002);** Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el Medio Ambiente.

**MENDOZA, M. J. Y DOMÍNGUEZ, L.,** Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas y su aplicación a un caso práctico. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Julio de 2006.

**MORA, C. R. (2004);** Evaluación de la Susceptibilidad al deslizamiento del Cantón de San José; Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

**RAMOS, G. MA. 1., GIL, C. A. J. Y FEITO, H. F. R.;** Estudio de deslizamiento de ladera en Olivar con pendiente. Del departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén.

**RISMUR (2006).** Estudio de Riesgo Sísmico en la provincia de Murcia.

**RODRÍGUEZ, C. E. (2001);** Hazard assessment of earthquake-induced landslides on natural slopes. Thesis Doctoral, University of London.

**SHUSTER, R. (1996);** Socioeconomic significance of landslides; Investigation and Mitigation: Special Report 247; Transportation Research Board, National Research Council Washington DC: National Academic Press; 12-36.

## REFERENCIAS WEB

<b>INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN):</b>	<a href="http://www.icin.es">http://www.icin.es</a>
<b>INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO (IGME):</b>	<a href="http://www.idme.es">http://www.idme.es</a>
<b>SCIENCE DIRECT:</b>	<a href="http://www.sciencedirect.com">http://www.sciencedirect.com</a>
<b>BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO (BOE):</b>	<a href="http://www.Boe.es">http://www.Boe.es</a>
<b>INSTITUTO DE CARTOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA DE ANDALUCÍA (ICEA):</b>	<a href="http://www.juntadeandalucia.es">www.juntadeandalucia.es</a>

## ANEXO 1. TIPOS DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA

A continuación se desarrollan los distintos tipos de deslizamientos enumerados en el apartado 5.2, “El fenómeno de deslizamientos de ladera”:

### 1. Desprendimientos o caídas:

Los desprendimientos o caídas son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos.

Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. El material considerado no incluye las pequeñas partículas. Estos movimientos son definidos con base en el material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, de detritos y de suelos. La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta (Cruden y Varnes, -1996). Estos movimientos ocurren en laderas fuertemente inclinadas, tanto de tipo natural como artificial. Se puede observar un ejemplo en la Figura Al.1. a.

### 2. Vuelcos o desplomes:

Un vuelco o desplome consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Su movimiento es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapso (Figura Al.1. b). Frecuentemente ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares. Se clasifican en vuelcos o desplome de rocas, de derrubios o detritos y de suelos.

### 3. Deslizamientos:

Los deslizamientos son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, lo cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura (Figura Al.1. c). Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, los cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de ruptura semiplanas u onduladas a los movimientos traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos.



- En los deslizamientos rotacionales, los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado.

Movimientos posteriores al inicial, pueden ocasionar el retroceso progresivo de la corona. La velocidad y extensión de este tipo de movimientos es muy variable. Los deslizamientos traslacionales son menos profundos que los rotacionales, y al igual que los planos, involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual está en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores.

Con base en las etapas del movimiento, los deslizamientos rotacionales se clasifican en simples, múltiples y sucesivos, clasificación que también se aplica a las variantes resultantes del tipo de material.

- Los deslizamientos traslacionales se subdividen en deslizamientos de roca en bloque, deslizamientos de derrubio en bloque y deslizamientos traslacionales de suelos.
- Los deslizamientos planos se clasifican en simples términos a partir también del material involucrado, por lo cual los principales tipos son los deslizamientos de rocas, deslizamientos de derrubios y las coladas de barro.

#### **4. Flujos:**

Los flujos son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar (Figura AI.1. d). El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular.

#### **5. Expansiones laterales:**

Estos movimientos son resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactas, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente (Figura AI.1 e). Ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas. La superficie de cizallamiento no está bien definida, la masa involucrada se mueve rápido y retrogresivamente, y puede tener una duración hasta de algunos minutos. Se clasifican en expansiones laterales en rocas, en derrubios y en suelos.

Este tipo de movimientos ocurre principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, los cuales se localizan en los márgenes de los antiguos casquetes de hielo en las costas de Noruega, Alaska y Canadá. Los flujos pueden ser desencadenados por movimientos rotacionales o por efectos sísmicos.

## 6. Movimientos complejos:

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo. Entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son resultados del colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador. El material involucrado es metaestable, con una estructura suelta y alta porosidad.

Durante el colapsamiento, la carga del terreno es transferida a los fluidos de los poros (generalmente agua), lo que ocasiona un incremento en la presión de estos últimos y, por ende, la pérdida de resistencia, ocasionando el flujo deslizante (Hutchinson, 1988). Por lo general, la morfología resultante es alargada y estrecha, y el área de depósito tiene un espesor relativamente bajo.

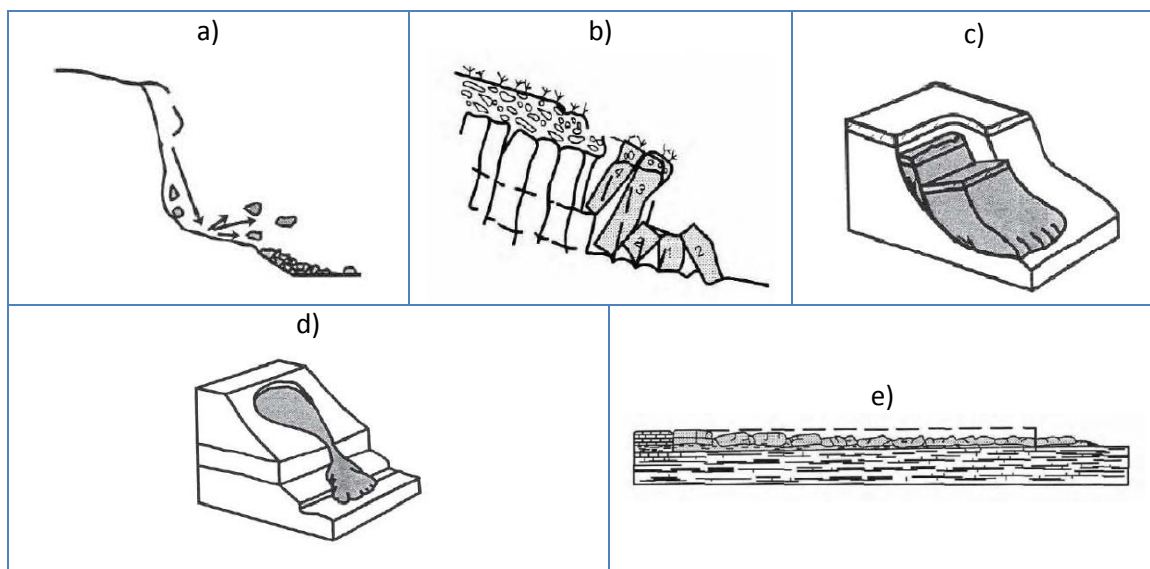


Figura Al.1. Esquemas de deslizamientos. a) desprendimiento o caída, b) vuelco o desplome, c) deslizamiento, d) flujo en una ladera y e) expansión lateral.

## ANEXO 2. NOMENCLATURA CORINE LAND COVER 2006

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
111	Territorio urbano continuo
112	Territorio urbano discontinuo
121	Zonas industriales y comerciales
122	Redes de carreteras y trenes y terrenos asociados
123	Zonas portuarias
124	Aeropuertos
131	Extracción de materiales
132	Vertederos
133	Canteras
141	Espacios verdes urbanos
142	Equipamientos deportivos y de esparcimiento
211	Tierras de cultivo fuera de zonas de regadío
212	Zonas de regadío permanente
213	Arrozales
221	Viñedos
222	Árboles y arbustos frutales
223	Olivares
231	Praderas
241	Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes
242	Sistemas parcelarios y de cultivo complejos
243	Superficies esencialmente agrícolas, interrumpidas por espacios naturales importantes
244	Territorios agro-forestales
311	Bosques de frondosas
312	Bosques de coníferas
313	Bosques mixtos
321	Praderas y pastizales naturales
322	Landas y zonas de maleza
323	Vegetación esclerófila
324	Bosque y vegetación arbustiva que están cambiando
331	Playas, dunas y arenales
332	Rocas desnudas
333	Vegetación poco frondosa
334	Zonas incendiadas
335	Glaciares y nieves perpetuas
411	Marismas interiores
412	Turberas
421	Marismas marítimas
422	Salinas
423	Zonas intercotidales (entre mareas)
511	Cursos y vías de agua
512	Planos de agua
521	Lagunas litorales
522	Estuarios
523	Mares y océanos

## ANEXO 3. CATEGORÍAS DEL MAPA GEOTÉCNICO

CLASES	DESCRIPCIONES GEOLÓGICAS	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA
I	Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, Jurásico y Triásico Andesitas, Basaltos, Esquistos y mármoles, Dolomías con sílex y dolomías	Rocas muy duras y poco fracturadas
IIa	Rocas metamórficas y sedimentarias: Filitas y cuarcitas, Intercalación de dolomitas y calizas, Areniscas	Roca dura y fracturada. Intercalación de rocas muy duras y duras
IIb	Rocas fundamentalmente sedimentarias de distinta edad y origen Calizas, calizas eolíticas y calizas margosas, conglomerados	Roca dura-media muy fracturadas con intercaladas con algunas capas de rocas blandas
IIIa	Rocas sedimentarias fundamentalmente margosas y arcillas (Jurásico, Cretácico y Terciario) Margas, Marga calizas, margas calcáreas.	Roca de resistencia media muy fracturada y con abundantes intercalaciones de rocas más blandas (margas y arcillas)
IIIb	Rocas fundamentalmente triásicas de Keuper. Arcillas abigarradas y yeso, sedimentos terciarios, arcillas margosas. Areniscas turbidíticas y arcillas verdes oscuras/ Cantos, costras y conglomerados del Cuaternario	Roca blanda con arcillas expansivas. Suelos no cohesivos poco cementados. H > a 30 mts / H > a 10 mts.
IV	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial y coluviales, piedemonte, etc.	Suelos no cohesivos inestables, gravas y arenas, cantos y costras
V	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial, dunas sedimentos eólicos. Depósitos expansivos de margas diatomíticas.	Suelos cohesivos blandos; Arcillas, Limos y Arenas. No Cohesivos. Poco Compactos Arenas, Arenas y Conchas, H > 10 m.
VI	Depósitos de playa y cauces del río, marismas, fangos, limos y limos arcillas. Arcillas o limos orgánicos.	Suelos muy blandos, H > 3 m. Suelos saturados y zonas con nivel freático < de 10 m. Suelos especiales que pueden producir fenómenos de licuefacción